

Construcciones fabulosas

VOLUMEN II

DEBATE
ediciones del Prado

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

CONSTRUCCIONES FABULOSAS

Volumen II

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

CONSTRUCCIONES FABULOSAS

Volumen II



Dirección editorial de la serie:
Juan María Martínez
Ángel Lucía

Coordinación editorial de la serie:
Juan Ramón Azaola
Carlos Ponce

Dirección técnica de la serie:
Eduardo Peñalba

Coordinación técnica de la serie: Rolando Dias
Edición: Luis G. Martín, Íñigo Castro, Lourdes Lucía y Anthony Lambert
Fotografía y documentación gráfica: José María Sáenz Almeida, Marta Carranza, Juan García Costoso, Nano Cañas y Elizabeth Loving
Directora de edición: Ruth Binney
Director de arte: John Bigg
Editor artístico: Peter Laws
Producción: Barry Baker y Janice Storr
Suscripciones: Francisco Perales
Apéndice geográfico: Gwen Rigby y Anthony Lambert
Texto: Nigel Hawkes
Versión castellana: Juan Manuel Ibeas

Título original: *Structures*

ISBN: 84-7444-595-7 Volumen II
Depósito legal: B-34.860-1993
Impreso en noviembre de 1993

Impreso y encuadernado en Printer,
Cuatro Caminos, Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Foto de cubierta: La nave espacial Tierra, Florida.
Fotografía de Alan Smith-Tony Stone Associates

Sumario

Volumen II

Proezas de la ingeniería civil

EL dominio humano sobre la naturaleza se mide por los logros de los ingenieros civiles, los hombres (y cada vez más mujeres) que construyen puentes, presas, carreteras y ferrocarriles, que excavan canales y levantan defensas costeras para contener la fuerza del mar. Sus obras, una vez terminadas, apenas reciben atención, a no ser que fallen, en cuyo caso se oye un coro de lamentaciones. Y esto se debe a que, a diferencia de otras formas de ingeniería, se espera que estas obras duren para siempre, que constituyan una modificación permanente del entorno natural. Los ingenieros civiles no sólo trabajan para sus clientes, sino que también tienen que hacerlo para la posteridad.

Algunas obras de ingeniería civil son tan enormes y permanentes que sobreviven incluso a su función original. La Gran Muralla China, posiblemente la construcción más imponente de toda la historia de la civilización, todavía se extiende de colina en colina a través de la inmensidad del país, a pesar de que la amenaza que debía contener hace mucho que desapareció. El canal de Panamá alteró la geografía de manera permanente, aunque es posible que algún día deje de utilizarse. La presa de Grand Coulee convirtió en tierra cultivable una extensión desértica del estado de Washington que jamás había producido nada. Y la costa de los Países Bajos ha quedado radicalmente

modificada —y los holandeses confían en que el cambio sea permanente— por el Plan Delta, una de las mayores y menos conocidas proezas de la ingeniería civil del siglo XX.

La ingeniería civil puede incluso cambiar conceptos. La nación canadiense no habría podido sobrevivir de no ser por un largo lazo de acero que la ha mantenido unida: el ferrocarril Canadian Pacific. La explotación de los recursos de Siberia no habría pasado de ser un sueño sin los ferrocarriles Transiberiano y BAM. Y el concepto de una Europa unida no tendría sentido de no ser por los ferrocarriles y carreteras que atraviesan la barrera de los Alpes, conectando Alemania y Suiza con Italia.

Al ir disminuyendo las reservas de combustibles fósiles, será preciso acelerar la búsqueda de fuentes alternativas de energía, mediante proyectos como la turbina de las Orcadas, para aprovechar la energía del viento, y el horno solar francés, que permitirá utilizar la energía solar.

A pesar de su permanencia, el trabajo de los ingenieros civiles nunca termina. En cuanto se concluye un gran proyecto, surge otro aún más ambicioso, que los adelantos de la técnica han hecho posible. Desde que se construyeron los primeros puentes y calzadas, los seres humanos no han cejado en su empeño de adaptar y utilizar la naturaleza, y no se advierten indicios de que vayan a desistir.

Proezas de la ingeniería civil
Gran Muralla China
Canal de Panamá
Canales del mundo
Ferrocarril Canadian Pacific
Ferrocarril transiberiano
Presa de Grand Coulee
Presas: controlando la fuerza del agua
Plan Delta holandés
Paso de San Gotardo
Las autopistas más grandes del mundo
Iron Bridge
El puente de Humber
Puentes célebres
Plataforma petrolífera Statfjord B
Generador eólico de las Orcadas
La central nuclear Chooz B
El horno solar de Odeillo

La fortificación más larga

Datos básicos

La construcción más grande que jamás se ha emprendido, tardó 20 siglos en terminarse y perfeccionarse.

Primer constructor: Shi Huangdi.

Fecha de construcción: Siglo III a.C.-siglo XVII d.C.

Materiales: Tierra, piedra, madera y ladrillo.

Longitud: 3.460 km.





Shi Huangdi (r. 221-210 a.C.), fundador de la dinastía Qin y primer emperador de China, inició la construcción de la Gran Muralla. A pesar de la brevedad de su reinado, Shi Huangdi estableció las formas políticas por las que China iba a regirse hasta 1911. También es famoso por el ejército de guerreros y caballos de terracota encontrados cerca de su tumba, en Xi'an.

La construcción humana más grande del mundo discurre a lo largo de casi 3.500 kilómetros a través de China, siguiendo un trazado sinuoso que algunos han comparado con el cuerpo de un dragón. La Gran Muralla China, construida durante un período de más de 1.800 años por millones de obreros y soldados, se extiende desde el mar Amarillo, en las proximidades de Pekín, hasta la Puerta de Jade de Jiayuguan, que señalaba el límite exterior de la influencia china y el comienzo de los desiertos de Asia central. La muralla servía de frontera entre la civilización china y los bárbaros del norte. Más allá de ella, la cultura china se diluía en las montañas y desiertos donde tribus nómadas subsistían en condiciones precarias. Según palabras del erudito norteamericano Owen Lattimore, la Gran Muralla representa «la línea de marea más colosal de la raza humana».

Su construcción se inició durante el reinado del primer emperador, Shi Huangdi, de la dinastía Qin, que emprendió una campaña de conquistas y consiguió unificar China en 221 a.C. Con anterioridad, y ya desde el siglo V a.C., existían murallas más pequeñas, construidas por los gobernantes locales, muchas de las cuales fueron destruidas por Shi Huangdi, que fundó un imperio eficiente e implacable, con un sistema de justicia penal, una red de carreteras nuevas y una burocracia que controlaba dónde vivía la población y hasta dónde se le permitía moverse. Los delincuentes eran castigados sin miramientos, y los que se negaban a trabajar eran reclutados por el ejército y destinados a los rincones más remotos del imperio. Estas personas fueron las que iniciaron la construcción de lo que ahora conocemos como la Gran Muralla.

Según los textos de historia de la época, Shi Huangdi envió a su general más importante, Meng Tian, con un ejército de 300.000 hombres, para que sometiera a los bárbaros del norte y construyera una muralla siguiendo las líneas del terreno y aprovechando los obstáculos y accidentes naturales para formar una barrera impenetrable.

Sin embargo, la mayor parte de la muralla que hoy podemos ver se construyó en una época muy posterior, durante la dinastía Ming (1368-1644). Su función seguía siendo la misma: contener las invasiones del norte y señalar de manera inequívoca los límites del imperio. La sección mejor conservada de la muralla Ming es la comprendida entre Pekín y el mar, un muro de 640 kilómetros que sigue el perfil de los montes Yanshan hasta llegar a Shanhaiguan.

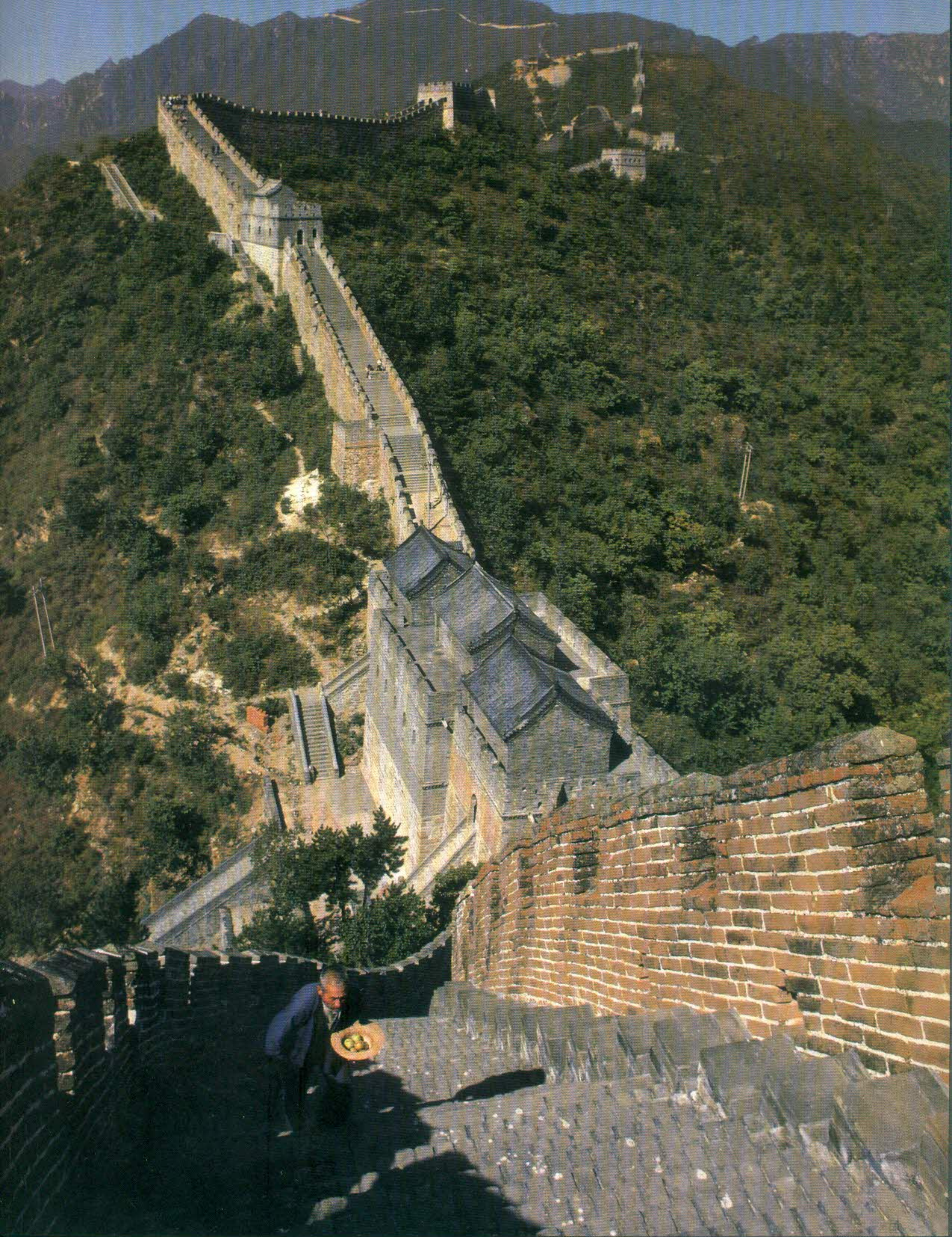
Entre estos dos períodos, otros gobernantes de China aportaron su contribución a la muralla, obligando a millones de trabajadores a levantar varias secciones. Shi Huangdi hizo trabajar a su ejército, más medio millón de campesinos. Más de 600 años después, en 446 d.C., Taiping Zhenjun envió a 300.000 trabajadores a levantar otra sección, y en 555 d.C., Tian Bao reclutó por la fuerza a 1.800.000 campesinos para trabajar en la muralla.

El interés por la muralla decayó durante algunos períodos. La dinastía Tang, que empezó a reinar en 618 d.C., consideraba que la mejor defensa es el ataque y se preocupó más por fortalecer su ejército que por reforzar la muralla. Pero cuando los Ming se hicieron con el poder, la muralla recuperó su carácter prioritario en los planes imperiales. La muralla que hoy conocemos es, pues, el resultado del trabajo de millones de hombres al servicio de una idea única.

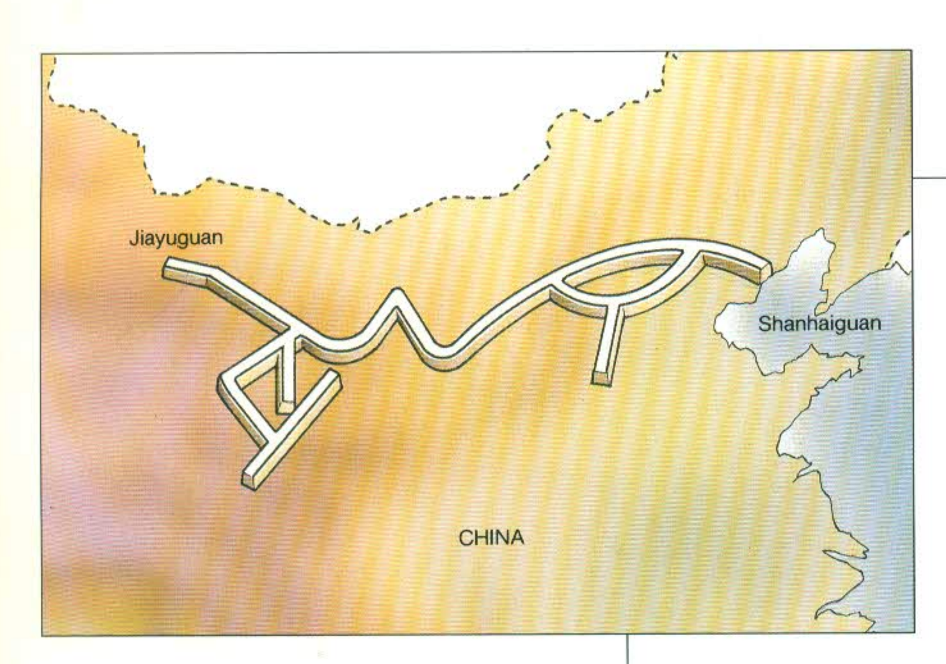
En su construcción se emplearon tierra, piedra, madera, tejas y, durante la dinastía Ming, ladrillos. Dadas las dificultades de transporte, se utilizaban los materiales existentes en cada lugar: piedra en lo alto de las montañas; tierra en las llanuras; arena, guijarros y ramas de tamarisco en el desierto de Gobi; roble, pino y abeto de los bosques de Liaodong, en el noroeste. Muchos de estos materiales no servían para construir una defensa permanente, y las secciones que han sobrevivido son las de piedra y las de ladrillos y tejas, de fecha muy posterior. Durante la dinastía Ming se construyeron hornos a pie de obra para fabricar los ladrillos, las tejas y la cal para unirlos.

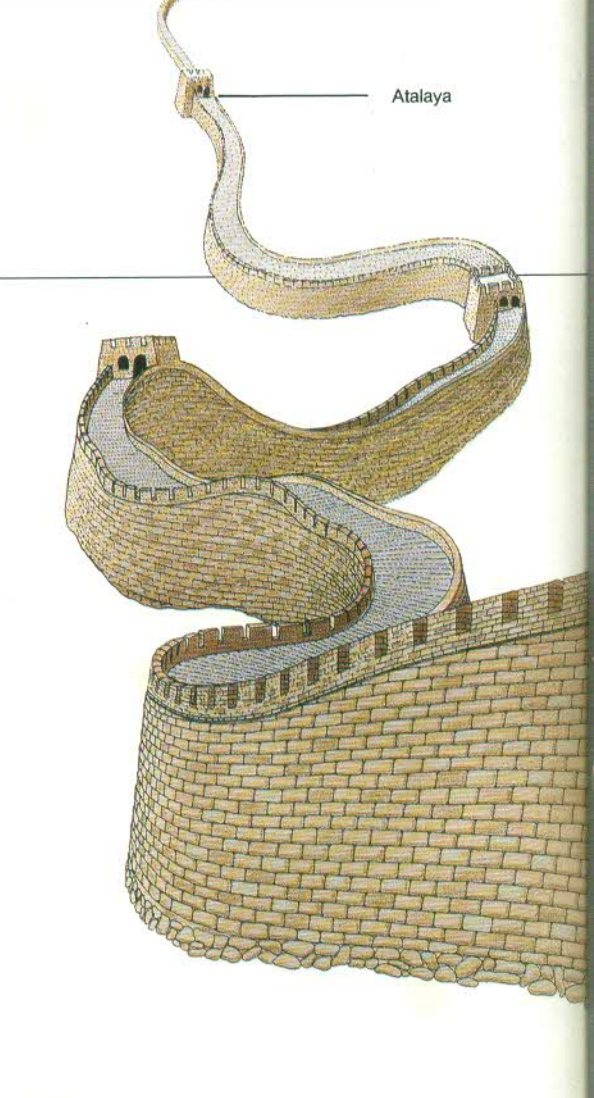
Los materiales de construcción se transportaban a fuerza de músculo, cargándolos a la espalda o colgados de pértigas. En ocasiones, los obreros formaban cadenas humanas para pasarse las piedras o ladrillos de mano en mano hasta lo alto de las montañas. También se utilizaban carretillas, y las rocas más grandes se izaban mediante tornos y se movían con palancas. Se utilizaron burros con alforjas cargadas de ladrillos y argamasa, y se dice que también cabras, con ladrillos atados a los cuernos.

Las murallas de tierra de la dinastía Qin se construyeron levantando vallas paralelas hechas con postes y tablas y llenando de tierra el espacio entre ellas. Se echaba una capa de tierra de 8 ó 10



La fortificación más larga





centímetros y se apisonaba con mazos antes de añadir la siguiente capa. Durante el período Ming se utilizaron métodos similares, pero aumentando el grosor de las sucesivas capas de tierra a unos 20 centímetros. Está técnica se utilizaba mucho en China para construir los muros de las casas.

Las secciones de piedra se construyeron allanando primero el terreno y colocando una serie de losas de piedra a manera de cimientos. A continuación, se levantaban las paredes exteriores de la muralla, llenando el hueco entre ellas con piedras pequeñas, escombros, cal y tierra. Cuando la muralla alcanzaba la altura suficiente, se añadía una cubierta de ladrillo, inclinada en las pendientes suaves o escalonada en las laderas de más de 45 grados.

Una de las características más notables de la Gran Muralla es la manera en que aprovecha las posibilidades defensivas del terreno, curvándose para seguir los accidentes naturales y dominando las alturas. En los puntos clave se construyeron fortalezas y atalayas para vigilar el territorio. Estos eran los lugares por donde más probable era el ataque enemigo: pasos de montaña, cruces de carreteras o meandros de un río en territorio llano. Según una enciclopedia del período Tang, «las torres deben construirse en lugares cruciales de las altas montañas o en las curvas en terreno llano».

Aunque la muralla tenía una función defensiva y utilitaria, muchos de sus detalles están diseñados con verdadero estilo. Las torres, las puertas y las fortalezas son con frecuencia muy hermosas y presentan una gran variedad de estilos arquitectónicos. A lo largo de la muralla había, además, templos y santuarios, casas de té y torres de reloj.

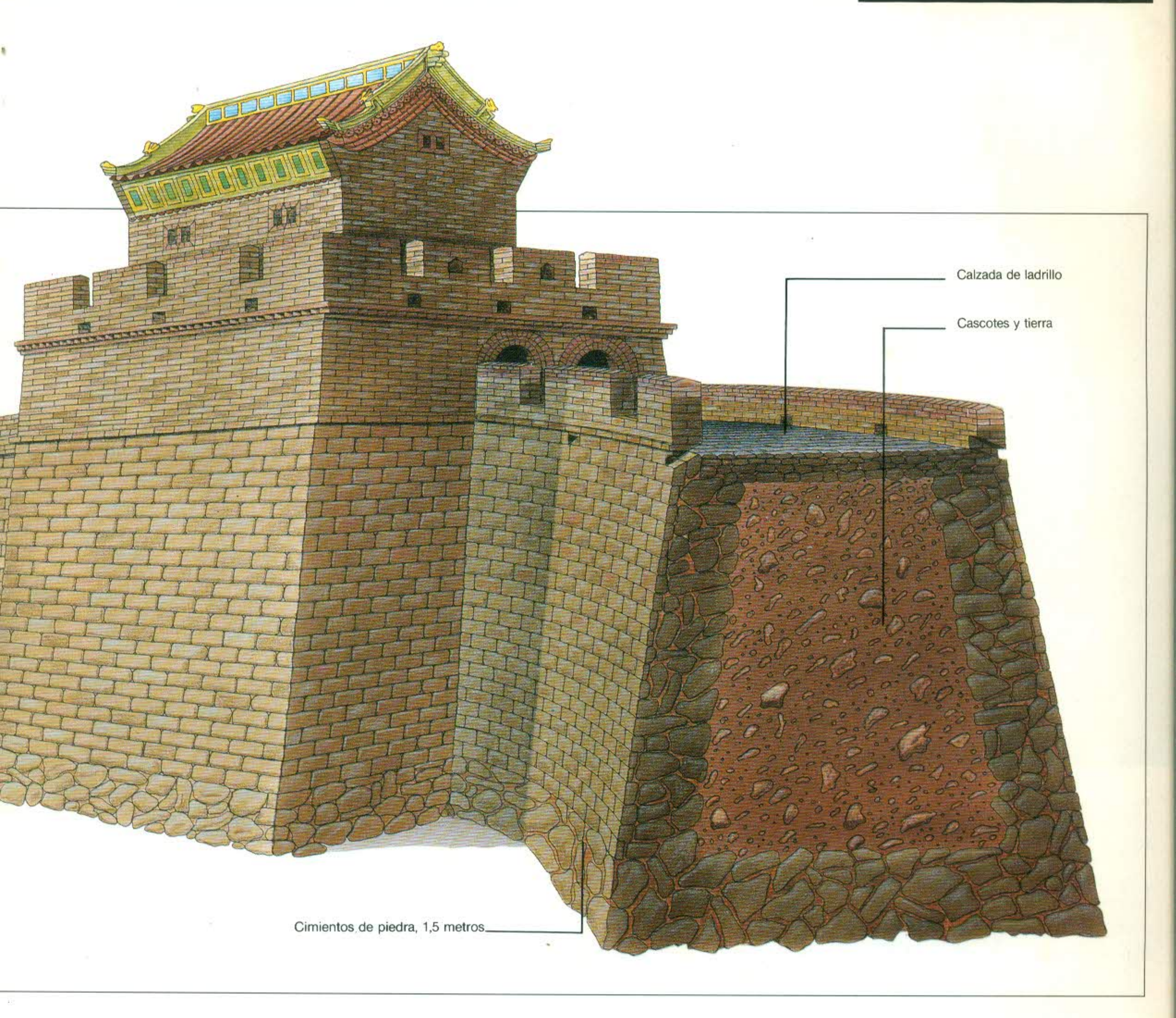
La muralla tiene una altura de 6 a 9 metros,

La muralla no forma una línea única, ya que incorpora una serie de murallas levantadas por sucesivos gobernantes. Las más antiguas eran rudimentarias y fue preciso reconstruirlas.

La muralla serpentea sobre las montañas, siguiendo las crestas del paisaje. Si la pendiente era inferior a 45 grados, el pavimento de ladrillo seguía el contorno de la muralla; si era superior, se hacían escalones.

Sección de la muralla
Altura: de 6 a 9 metros
Anchura: 7,5 metros en la base, 6 en lo alto





Atalayas
La muralla tiene unas 25.000 atalayas de planta cuadrada, de unos 12 metros de lado y otro tanto de altura. En las torres de señales, situadas a una distancia máxima de 17 kilómetros, se quemaba estiércol de lobo, azufre y nitrato, para producir una columna de humo que indicara a las torres vecinas la intensidad de un ataque. De noche, se utilizaba leña seca.

con una anchura de 7,5 en la base, y más estrecha —menos de 6 metros— en lo alto. (Estas medidas corresponden a la sección mejor conservada de la muralla, que se encuentra cerca de Pekín y se construyó durante el período Ming.) Aproximadamente cada 200 metros, en el lado chino de la muralla hay una puerta en forma de arco, con una escalera que conduce a lo alto; la cubierta servía como carretera y como línea de defensa, por donde las tropas podían moverse con rapidez, de diez en fondo, para reforzar a la guarnición que sufriera un ataque.

En el borde interior había un parapeto de un metro de altura para reducir el peligro de caídas; por el exterior, había almenas de hasta 1,80 m de altura para defenderse de los ataques. Cada 100 ó 200 metros una plataforma sobresalía de la muralla: además de servir como contrafuerte para reforzarla, desde estas plataformas los soldados podían disparar contra los enemigos que trataran de escalar la muralla.

A intervalos similares había terraplenes, que en realidad eran construcciones de dos o tres plantas donde vivían los soldados. Estos terraplenes, de 9 a 12 metros de altura y 35 a 55 metros de lado en la base, estaban rematados por una plataforma desde donde se podían disparar cañones. En cada terraplén había habitualmente una guarnición de 30 a 50 soldados, mandados por un suboficial.

En caso de ataque, los soldados utilizaban un elaborado sistema de señales para indicar su im-

La fortificación más larga



Un autor chino describió la gran muralla como un dragón que sumerge la cabeza para beber en el mar de Bo Hai, junto a Shanhaiguan (arriba). La «cabeza» es una sección de 23 metros que se adentra en el mar, y que resultó dañada por las fuerzas inglesas que acudieron en 1900 a sofocar la rebelión de los bóxers. La puerta de la primera fortificación se conoce como «el Primer Paso bajo los Cielos».

portancia: una fogata y una salva significaban de 2 a 100 enemigos; dos fogatas y dos salvas, hasta 500 enemigos, y así sucesivamente, hasta cinco fogatas y cinco salvas, que significaban un ataque de más de 10.000 soldados enemigos.

En épocas de paz, los soldados se autoabastecían cultivando los terrenos próximos a la muralla. Montaban guardia y controlaban las idas y venidas de los mercaderes que cruzaban la muralla con mercancías para vender. Eran responsables del mantenimiento de la muralla, y recibían estrictas instrucciones al respecto. Entre sus armas figuraba la pólvora, inventada durante el período Ming, que se utilizaba en varios tipos de granadas.

No existía entonces verdadera artillería, pues en tal caso la muralla habría resultado mucho más difícil de defender, pero sí que se empleaban ballestas de asedio y una variante de la catapulta romana para disparar grandes proyectiles a considerables distancias. En el combate cuerpo a cuerpo se utilizaban espadas, lanzas y bastones, y también había tropas de caballería.

La longitud de la muralla, que durante el período Ming se cifraba en 10.000 li (6.400 kilómetros), estaba dividida en nueve zonas militares, cada una bajo el mando de un general. En caso de ataque, las nueve secciones quedaban sometidas a la autoridad del ministro de la Guerra. Cada zona militar tenía su cuartel general en una ciudad situada junto a la muralla o en una fortaleza importante, bien comunicada con la capital. Parece que el sistema funcionaba a la perfección.

Para la dinastía Ming, la muralla era lo único que se interponía entre ellos y las hordas mongolas, que habían iniciado la construcción de su imperio bajo el mando de Gengis Kan, a principios del siglo XIII. A pesar de su reducido número y del pequeño tamaño de su ejército, de sólo 250.000 hombres, la ferocidad de los mongoles les permitió franquear la Gran Muralla y conquistar China. A finales del siglo XIII, su imperio se extendía por Asia y Europa, desde Corea hasta Polonia y Hungría por el norte, y desde el sur de China hasta Turquía por el sur.

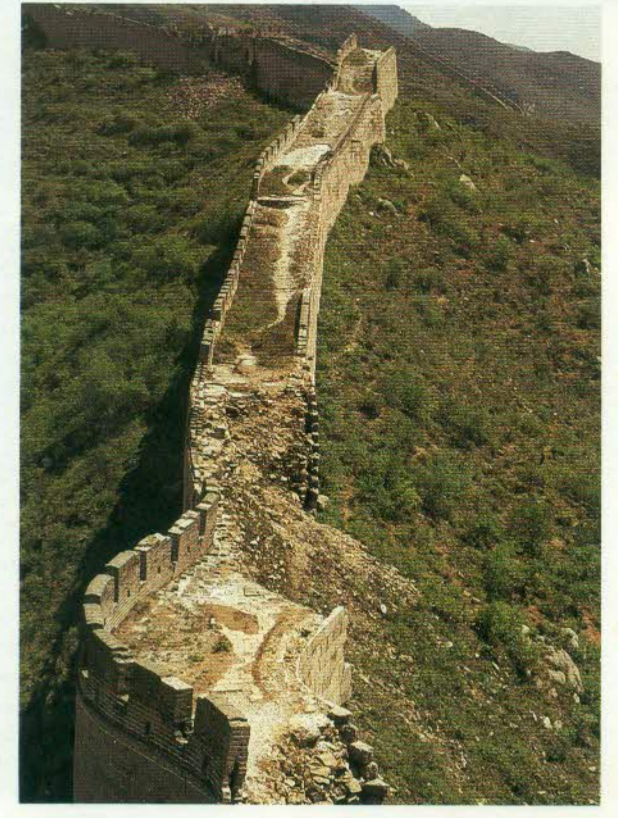
El gran emperador Kublai Kan, nieto de Gengis, ocupó el trono de China en 1260, y reinó con considerable talento. Sin embargo, después de su muerte, el dominio mongol comenzó a desmoronarse, hasta que fueron expulsados más allá de lo que quedaba de la muralla y Zhu Yuanzhang fundó la dinastía Ming.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, no es de extrañar que los Ming dedicaran grandes esfuerzos a reforzar la muralla, como única manera de impedir otro ataque victorioso de los mongoles. Zhu envió a sus nueve hijos al norte, poniéndolos al frente de las nueve guarniciones que defendían la muralla, e hizo construir muchas nuevas fortificaciones. La construcción continuó durante todo el reinado de la dinastía Ming, de 1368 a 1644, que fue el período durante el que se levantó la mayor parte de la muralla que hoy conocemos.

Una construcción tan prodigiosa como la muralla china no podía dejar de llamar la atención de los europeos. El doctor Johnson se sentía especialmente fascinado por ella y sentía grandes deseos de visitarla en persona. Cierto día, su biógrafo, James Boswell, le comentó a Johnson que también a él le gustaría visitar la muralla si no tuviera hijos que atender, y obtuvo de Johnson la siguiente respuesta: «Señor, visitándola haría usted algo muy importante por la educación de sus hijos. Su iniciativa y su curiosidad quedarían reflejadas en ellos. Siempre se los consideraría como los hijos de un hombre que fue a ver la Gran Muralla China. Lo digo en serio, señor James Boswell.»

En 1909, el escritor norteamericano William Edgar Geil se convirtió en uno de los primeros occidentales que recorrieron toda la longitud de la muralla, y se mostró absolutamente entusiasmado, asegurando que los constructores de la muralla estaban muy por encima del insensato militarismo europeo.

La muralla, a su paso por Gubeikou, provincia de Hebei, donde la dinastía Ming instaló una guarnición militar encargada de vigilar 12 pasos, el más importante de los cuales era el propio Gubeikou. Aquí fue donde el primer embajador británico en China contempló por primera vez la muralla, en 1793.



Las secciones no restauradas de la muralla se encuentran en distintos grados de ruina, desde meros montones de tierra hasta sectores de piedra que necesitan pocas restauraciones. Este segmento se encuentra junto a la sección restaurada que los turistas visitan en Badaling, al este de Pekín.

Durante la década de los ochenta, más de cuatro millones de personas han seguido cada año los pasos de Geil, aunque muy pocos han ido más allá de la sección mejor conservada de la muralla, que se encuentra a corta distancia de Pekín. Uno de los pocos que lo han hecho ha sido William Lindsay, investigador universitario de Merseyside, Inglaterra, en 1987. Según la agencia de noticias Nueva China, Lindsay fue el primer extranjero que recorrió, en solitario y a pie, 2.400 kilómetros de muralla. El viaje, realizado en parte corriendo, en parte andando y en parte cojeando, duró 78 días, con un descanso de cuatro meses en medio.

Durante el siglo XX, China ha carecido de los recursos necesarios para mantener la muralla en el estado que merece. Algunos tramos ofrecen un aspecto espléndido, pero otras partes, fuera de las rutas turísticas, se encuentran prácticamente en ruinas.

La muralla ha perdido ya su función defensiva, aunque las tropas chinas la utilizaron como ruta de desplazamiento durante la guerra contra Japón. Sin embargo, sigue siendo una de las maravillas del mundo, un sobrecogedor ejemplo de la fuerza, el ingenio y la tenacidad de la raza humana.

Conexión entre océanos

Datos básicos

Cuando se construyó, era el proyecto de ingeniería más grande y más costoso del mundo.

Ingenieros: De Lesseps, John Stevens, George W. Goethals.

Fecha de construcción: 1881-1889, 1904-1914.

Longitud: 82.300 m.





La construcción de un canal que conectara los océanos Atlántico y Pacífico ha sido la obra de ingeniería más ambiciosa y más cara que jamás se ha emprendido. Más de 40 años transcurrieron desde que se concibió la idea hasta que lo atravesó el primer barco. Dio trabajo a miles de obreros y abrió nuevos caminos a la ingeniería, la planificación de obras, la medicina y las relaciones laborales. Constituyó el último alarde del optimismo europeo de finales del siglo XIX, y la primera evidencia de que los Estados Unidos se habían convertido en una gran potencia. Alteró la geografía, dividiendo un continente para unir dos océanos, e incluso contribuyó a crear una nueva nación, Panamá.

La historia comenzó en 1870, cuando dos navíos de la marina estadounidense fueron enviados al istmo de Darién, la delgada franja de tierra que conecta las dos Américas, con la misión de localizar el sitio más adecuado para excavar un canal. Los cálculos no podían ser más claros: desde Nueva York hasta San Francisco, dando la vuelta al cabo de Hornos, había un recorrido de 20.000 kilómetros que duraba un mes entero; pasando por el canal, la travesía quedaría reducida a 8.000 kilómetros. Sin embargo, las dificultades que entrañaba abrir un canal a través de esta delgada franja de tierra —sólo 48 kilómetros en su parte más estrecha— eran inmensas. Poco después de 1850, la construcción de un ferrocarril en la misma zona había tardado cinco años y costado seis veces más que lo presupuestado. Miles de trabajadores habían muerto de cólera, disentería, fiebre amarilla y viruela.

Sin embargo, antes de que los Estados Unidos dieran un paso más, un grupo de financieros franceses obtuvo una concesión para construir un canal desde Colón hasta Panamá. El ingeniero elegido fue Ferdinand de Lesseps, diplomático y político francés que se había labrado una reputación durante la construcción del canal de Suez. De Lesseps llegó a Panamá en 1880 y, tras una apresurada inspección, decidió construir un canal siguiendo los cursos de los ríos Chagres y Grande, que conectaría los océanos al nivel del mar y seguiría de cerca la línea ferroviaria. Nada más comenzar las obras, empezaron a morir personas. Panamá era uno de los lugares más insalubres de la Tierra: los mosquitos se criaban a millones en charcas y pantanos; no existían sistemas de eliminación de aguas y los conocimientos médicos de los pioneros franceses resultaban insuficientes. Uno de los que trabajaron en el canal fue el pintor francés Paul Gauguin, que llegó en 1887 con la intención de comprar un terreno y vivir a base de fruta y pescado. Tanto el país como la población le resultaron odiosos, y en cuanto logró reunir suficiente dinero se marchó a la Martinica.

En 1889, la empresa de De Lesseps quebró, tras haberse comprobado que el proyecto de abrir un canal al nivel del mar resultaba impracticable. Tras el fracaso vino el escándalo: Ferdinand de Lesseps fue acusado de corrupción, y la quiebra de la compañía se convirtió en un *affaire* nacional, que hizo caer gobiernos y destruyó reputaciones. Se habían gastado en total 287 millones de dólares —mucho más de lo que había costado hasta entonces ninguna operación en tiempo de paz—, habían muerto por lo menos 20.000 personas, y sólo se habían construido 30 kilómetros de canal. Francia había fracasado de manera humillante.

A comienzos del nuevo siglo, los Estados Unidos habían recuperado el interés por el canal, y entablaron negociaciones con el gobierno de Colombia, ya que Panamá era entonces un departamento colombiano. Los colombianos rechazaron el acuerdo propuesto pero, con el tácito apoyo del presidente Theodore Roosevelt, un grupo de panameños declaró la independencia de su país. Washington reconoció a su gobierno en menos de dos días y Roosevelt consiguió del nuevo gobierno la autorización para abrir el canal, a cambio de 10 millones de dólares y 250.000 dólares más cada año a partir de 1913.

La primera tarea, sin la que todo lo demás habría fracasado, consistió en combatir las enfermedades en Panamá. Un médico militar, el coronel William Gorgas, se hizo cargo de los hospitales y las medidas sanitarias. Habían elegido al hombre adecuado: Gorgas, que ya había participado en la erradicación de la fiebre amarilla en Cuba, eliminando el mosquito *Stegomya fasciata,* emprendió una campaña contra esta especie y contra el mosquito *Anopheles,* transmisor de la malaria, y consiguió transformar la situación sanitaria en Panamá.



El lago Gatún, atravesado por el canal, se creó por medio de una presa y unos sistemas de esclusas a los extremos, y forma la parte central del canal. Las mayores dificultades se encontraron en la cortada de Culebra (derecha), ahora llamada de Gaillard. Cada día, 60 excavadoras de vapor llenaban de tierra trenes enteros. En numerosas ocasiones, quedaron sepultadas por los derrumbamientos de las paredes del canal, que se hicieron más frecuentes a partir de 1911, al avanzar la excavación.



Pero todavía faltaba excavar el canal. A diferencia de De Lesseps, los ingenieros norteamericanos no se plantearon la posibilidad de construir un canal al nivel del mar, sino que diseñaron una serie de esclusas que llevarían a los barcos hacia arriba y hacia abajo, lo cual resultaba mucho más práctico. Pero la obra seguía siendo colosal. La parte más difícil fue la cortada de Culebra (ahora llamada Gaillard), una franja de 12 kilómetros comprendida entre Bas Obispo y Pedro Miguel, donde hubo que crear un cañón artificial a través de una montaña, utilizando excavadoras de vapor, explosivos y el esfuerzo de 6.000 hombres. Se necesitaron siete años y 27.000 toneladas de dinamita, una energía explosiva superior a la utilizada en todas las guerras libradas hasta entonces por los EE UU. El ruido era infernal, el peligro tremendo y la pérdida de vidas incalculable.

El principal problema era la inestabilidad de la

Conexión entre océanos

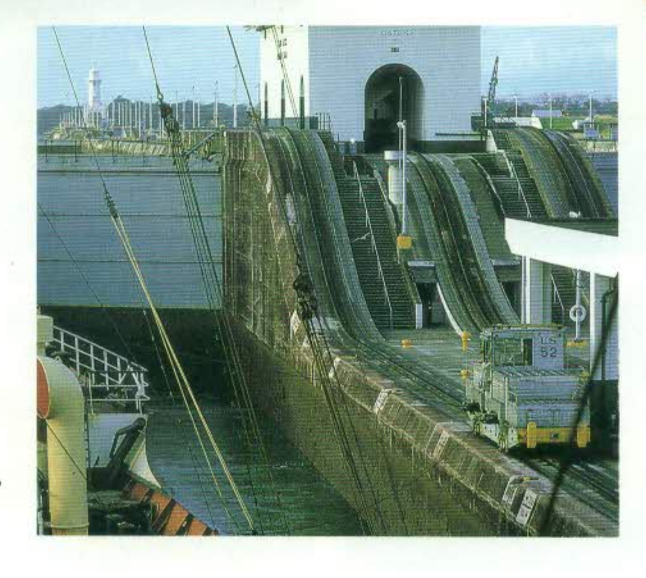


Los barcos pasan del mar Caribe al océano Pacífico en dirección este.

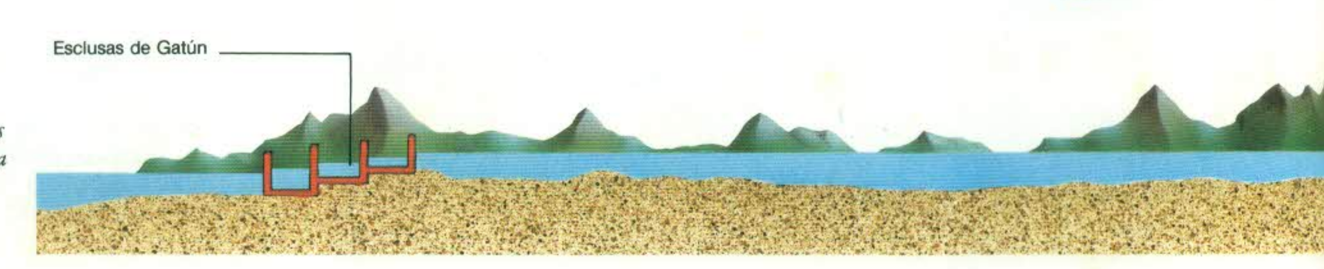
Mar Caribe
Colón
Esclusas de Gatún
Presa de Gatún
Lago Gatún
CANAL DE PANAMÁ
Lago Gatún
Ferrocarril de Panamá
Zona del Canal
Cortada de
Autopista Panamericana



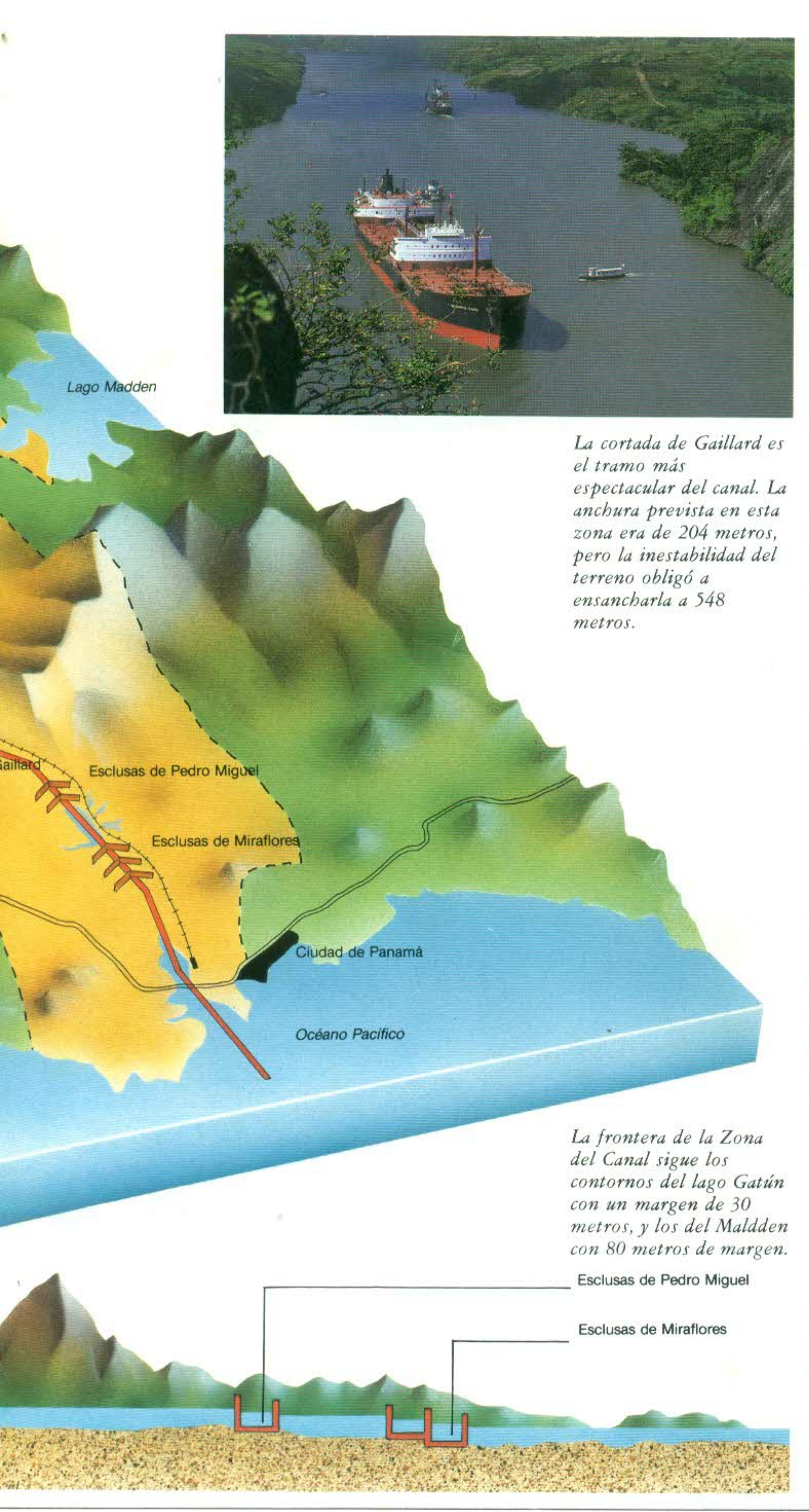
Los buques más grandes apenas tienen espacio para pasar por las esclusas. Hay tres pares de esclusas en Gatún y, en el otro extremo del lago, uno en Pedro Miguel y dos en Miraflores.



En cada esclusa, los buques son remolcados por locomotoras eléctricas, utilizando tornos de motor y 240 metros de cable de acero, que funcionan con absoluta suavidad.



Esta sección del canal permite apreciar la subida al lago Gatún, cuya superficie se encuentra a 25-26 metros sobre el nivel del mar. La del lago Miraflores está 16 metros por encima del nivel del mar.



La cortada de Gaillard es el tramo más espectacular del canal. La anchura prevista en esta zona era de 204 metros, pero la inestabilidad del terreno obligó a ensancharla a 548 metros.

La frontera de la Zona del Canal sigue los contornos del lago Gatún con un margen de 30 metros, y los del Maldden con 80 metros de margen.

roca. Al retirarla de los costados de la excavación, las paredes se abombaban a causa de la presión, que las empujaba hacia afuera. Lo mismo sucedía con el suelo del canal, que se levantaba de cinco a seis metros, a veces con rapidez prodigiosa. Resultaba verdaderamente frustrante. Se intentó de todo para contener los desmoronamientos, incluyendo revocar las paredes con hormigón, pero todo en vano. El hormigón se desmenuzaba y se desprendía junto con la roca. La única solución consistía en reducir la inclinación de las paredes hasta que la roca se estabilizara, lo cual significaba transformar la estrecha hendidura en una amplia depresión en forma de plato.

La serie de esclusas construidas a cada extremo del canal asombró al mundo. Eran las mayores que se habían visto, y puestas de pie habrían resultado más altas que casi todos los edificios actuales de Manhattan, exceptuando el Empire State, el World Trade Center y unos pocos más. Sin embargo, no se trata de simples edificios, sino de máquinas que funcionan con la eficacia de una máquina de coser. Se tardó cuatro años en construirlas: las obras comenzaron en agosto de 1909 y se construyeron de dos en dos, para que pudieran funcionar dos líneas de tráfico a la vez.

Las esclusas están hechas de hormigón, vertido en grandes moldes de madera. El suelo de cada cámara tiene de 4 a 6 metros de grosor, y las paredes tienen un espesor de hasta 15 metros al nivel del suelo, adelgazándose escalonadamente por fuera hasta llegar a medir sólo 2,5 metros de grosor en la parte alta. Para construir las 12 cámaras se utilizaron 3,3 millones de metros cúbicos de hormigón, que todavía se mantiene en perfectas condiciones.

Las paredes de las cámaras no son macizas, sino que están horadadas por grandes conductos por donde pasa el agua para llenar y vaciar las cámaras. El agua procede de los lagos Gatún y Miraflores, y penetra en cada cámara por 70 orificios abiertos en el fondo, lo que le permite levantar con suavidad los barcos. El desagüe se efectúa por un sistema similar de orificios, para hacer descender los barcos que van en dirección contraria. El flujo de agua se controla mediante compuertas deslizantes de acero que corren sobre rodamientos de rodillos.

Al extremo de cada cámara hay unas enormes compuertas, cada una de las cuales pesa cientos de toneladas. Están hechas con planchas de acero remachadas sobre un esqueleto de vigas de acero y giran juntas formando una V aplanada. Están diseñadas para que floten y ejerzan la menor presión posible sobre sus bisagras. Cada hoja mide 20 metros de anchura y 2 de grosor, pero su altura varía según la posición. La más grande es la de Miraflores, que tiene una altura de 25 metros y pesa 745 toneladas.

Conexión entre océanos

El funcionamiento de un canal con esclusas depende del agua. Dada la abundancia de lluvias en Panamá, hasta hace poco no parecía existir peligro de que el canal se secara. Sin embargo, los lagos dependen de la selva tropical que los rodea para reponer el agua que pierden cada vez que un barco atraviesa el canal. La desmesurada tala de árboles ha reducido la capacidad del bosque de actuar como una esponja gigante, disminuyendo la afluencia de agua a los lagos, y se empieza a temer que la escasez de agua ponga en peligro el funcionamiento del canal en el futuro.

La salida de aguas del lago Gatún se utiliza para generar electricidad, que a su vez hace funcionar todas las instalaciones del canal: las válvulas, las compuertas de las esclusas y las pequeñas locomotoras que circulan sobre raíles en lo alto de las esclusas, remolcando los barcos. No se permite que los barcos atraviesen las esclusas por sus medios, por temor a que pierdan el control.

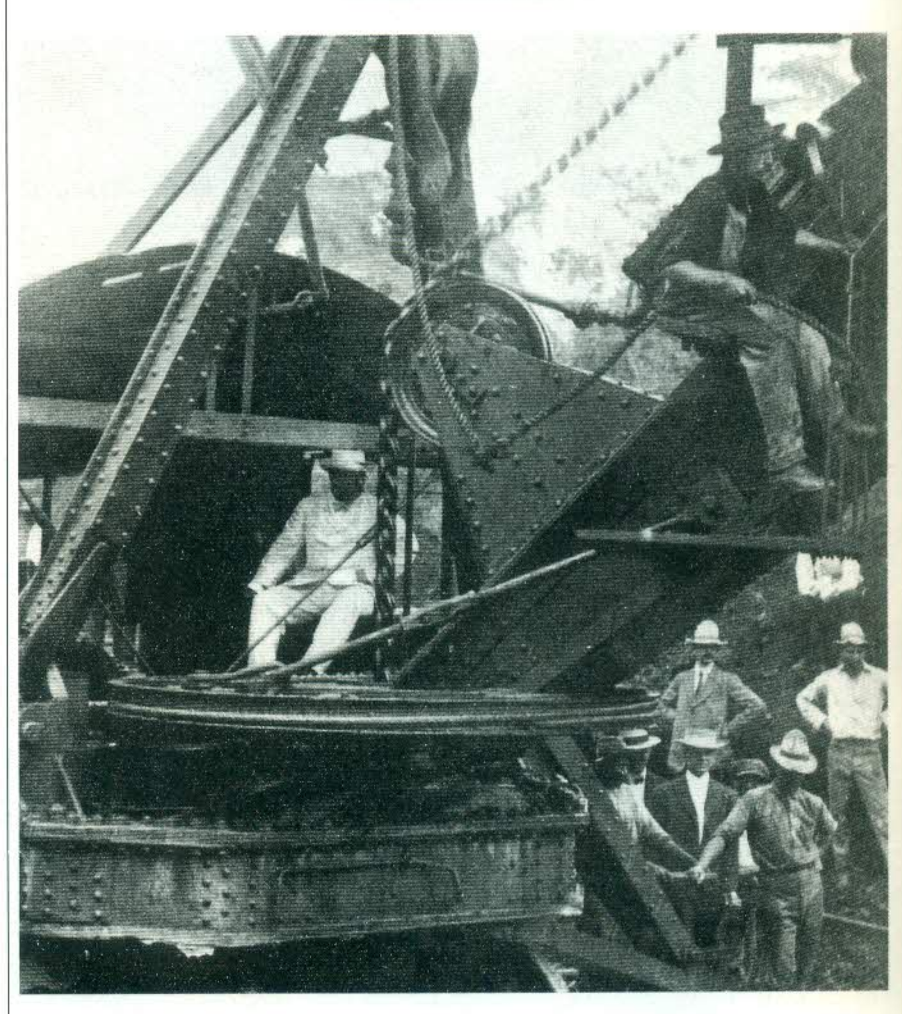
Con excepción del manejo de las locomotoras, todo lo demás está diseñado para que lo pueda controlar una sola persona desde un solo tablero de mandos. En este tablero están indicadas todas las funciones de las esclusas —las compuertas, las válvulas, los niveles del agua—, y junto a cada una hay un único interruptor. Los interruptores sólo se pueden mover en el orden adecuado, de manera que, por ejemplo, resulta imposible intentar abrir las compuertas mientras está entrando agua en las esclusas.

Gracias a estos tableros de control, el canal ha funcionado a la perfección desde el 7 de enero de 1914, cuando un viejo remolcador francés, el *Alexandre la Valley,* realizó con poca ceremonia el primer tránsito completo a través del canal. El 3 de agosto, el carguero de cemento *Cristóbal* se convirtió en el primer buque transatlántico que pasaba de un océano a otro, y el 15 de agosto cruzó el canal el primer barco de pasajeros, el *Ancon.* Pero la cortada de Culebra todavía iba a ocasionar problemas, y en octubre un enorme desprendimiento taponó todo el canal. Se produjeron nuevos desprendimientos en 1915, y siempre ha sido preciso seguir dragando el canal.

Diez años después de la inauguración, circulaban por el canal más de 5.000 barcos al año, y para 1939 la cifra se había elevado a 7.000. Se duplicó después de la segunda guerra mundial, y en los primeros años setenta alcanzó un máximo de 15.000 barcos al año. La mayor tarifa pagada por un barco ascendió a 42.077 dólares con 88 centavos, y la abonó el *Queen Elizabeth II* en marzo de 1975; la tarifa más baja, 36 centavos, la pagó en los años veinte Richard Halliburton, que recorrió el canal a nado en varias jornadas. Consiguió convencer a las autoridades de que le permitieran atravesar las esclusas a nado y pagó una tarifa basada en su peso, como una embarcación.

Los creadores del canal de Panamá

Una obra de la envergadura del canal de Panamá necesita personajes de calibre especial para llegar a término. Cuatro de estos hombres intervinieron en su construcción.



Presidente Theodore Roosevelt

Si hubiera que atribuir a una sola persona el mérito de la construcción del canal de Panamá, ésta sería Theodore Roosevelt. Su ambición convirtió a los Estados Unidos en una potencia mundial, «la potencia dominante en las costas del océano Pacífico». Como secretario de Marina, gobernador de Nueva York y, por último, presidente, Roosevelt realizó una ardiente campaña en favor del canal, aunque durante muchos años creyó que se construiría en Nicaragua, y no en Panamá. Como presidente, dirigió las intrigas que culminaron en la creación de Panamá, y luego desoyó los deseos del Congreso, otorgando plenos poderes para la construcción del canal a George Goethals. Aunque fueron tres los presidentes que participaron en la construcción —Roosevelt, Taft y Wilson—, fue Roosevelt quien convirtió la idea en algo inevitable. Según Goethals, «Roosevelt fue el verdadero constructor del canal», y no habría hecho más méritos «si hubiera extraído personalmente la tierra a paletadas».

Las compuertas de las esclusas de Gatún durante la construcción.

John Frank Stevens

Stevens era un ingeniero con un extraordinario historial de éxitos en el tendido de vías férreas cuando Roosevelt le encargó la construcción del canal en 1905. En 1886 había construido una línea ferroviaria de 645 kilómetros a través de pantanos y bosques de pino en el alto Michigan, sobreviviendo a las enfermedades, los ataques de indios y lobos, y el frío intenso de los inviernos norteamericanos.
Cuando recibió el encargo de construir el canal, Stevens heredó un verdadero problema. Había transcurrido ya un año, se habían gastado 128 millones de dólares, y apenas se había hecho nada. No existían planos ni organización. Los materiales que llegaban a Panamá permanecían amontonados, y los ingenieros desertaban en cuanto podían conseguir pasaje en un barco. Escaseaban los alimentos, proliferaban las enfermedades y la moral andaba por los suelos. Stevens interrumpió las obras y comenzó a planificar: fomentó las medidas sanitarias y reorganizó los ferrocarriles, imprescindibles para retirar los residuos. Hizo construir un almacén frigorífico para conservar los alimentos; proporcionó viviendas a los ingenieros y los invitó a llevar con ellos a sus esposas y familias; incluso construyó campos de béisbol y centros de reunión, organizó conciertos y creó una comunidad saludable. Stevens era ferviente partidario de un canal con esclusas, y por fin se salió con la suya. En 1906 recibió a Roosevelt, cuya visita al canal hizo dar un vuelco a la opinión pública norteamericana. Pero en febrero de 1907, escribió una larga carta a Roosevelt, declarándose agotado, quejándose de las constantes críticas que recibía, y describiendo el canal como «nada más que una gran zanja» cuya utilidad jamás había comprendido. Solicitaba un descanso, pero el presidente interpretó la carta como una renuncia y la aceptó de inmediato.

George Washington Goethals

El sucesor de Stevens fue George Goethals, teniente coronel del Cuerpo de Ingenieros. Roosevelt lo designó para presidir la comisión de siete personas que el Congreso había insistido en nombrar, pero dejó claro que Goethals era el jefe.
Cuando Goethals hubo inspeccionado las obras en compañía de Stevens, manifestó su admiración por el trabajo de éste: «No nos queda nada por hacer... excepto continuar tan excelente trabajo.» Goethals era un hombre rígido y trabajador, que se permitía pocos placeres. Era duro, enérgico y no gozaba de muchas simpatías, pero sabía elegir a sus colaboradores y delegar funciones. Todos los domingos por la mañana, entre las 7,30 y las 12, cualquier empleado que tuviera una queja podía acudir a hablar con él. Las sesiones dominicales de Goethals, en las que actuaba como una mezcla de confesor y juez, eran una innovación nunca vista en las relaciones laborales. Con ellas se ganó el apoyo de los trabajadores, sin lo cual jamás se habría podido construir el canal.
Goethals era inmune al desaliento. Cuando las paredes de la cortada de Culebra se derrumbaron por enésima vez, echando a perder meses de trabajo, Goethals se personó en el lugar y sus asistentes le preguntaron: «¿Qué hacemos ahora?» «Demonios, pues cavar otra vez», fue su respuesta. Así lo hicieron, y así se siguió haciendo hasta completar el canal.

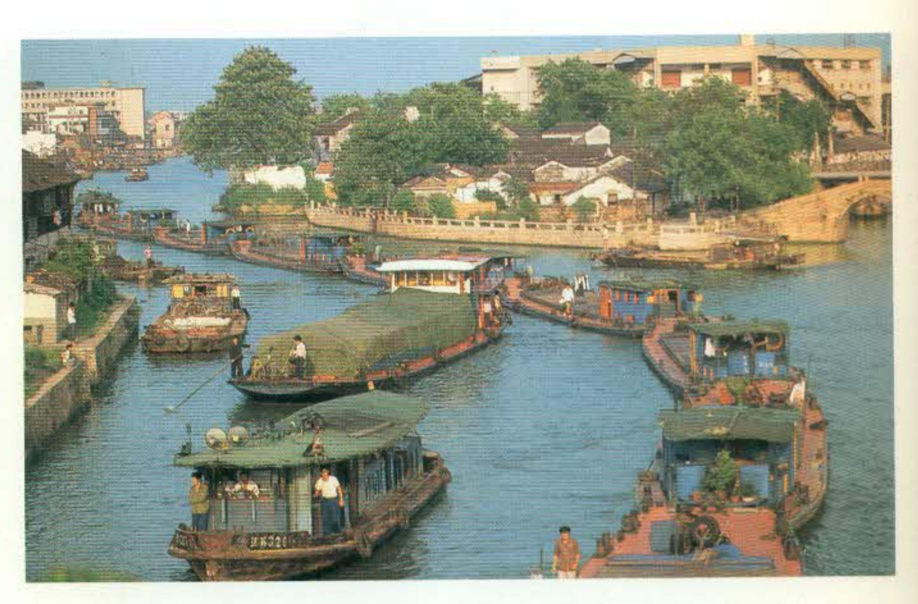
Dr. William C. Gorgas

Todo el trabajo de los ingenieros habría sido en vano sin los servicios del doctor Gorgas, el hombre que consiguió controlar las enfermedades endémicas de Panamá. Con el apoyo entusiasta de Stevens y Roosevelt, Gorgas eliminó los mosquitos, a los que creía portadores de enfermedades. Podría no haber dado resultado, ya que se sabía muy poco al respecto, y sus detractores clamaban que se estaba malgastando dinero, pero tenía razón, y a los 18 meses de su llegada la fiebre amarilla había quedado erradicada y la malaria empezaba a poderse controlar. Además, Gorgas hizo construir pavimentos adecuados, hospitales e instalaciones sanitarias. El país que había sido la tumba de las esperanzas de De Lesseps se convirtió en aceptablemente saludable, en una de las mayores proezas realizadas en el campo de la salud pública.

Canales del mundo

El mérito de la construcción del primer canal parece corresponder a los chinos, aunque existen indicios de una especie de canal construido en Irak unos 4.000 años a.C. No obstante, el más antiguo del que existe constancia, y que todavía continúa en funcionamiento, es el Gran Canal, que conecta Tianjin y Hangzhou, construido entre los años 485 a.C. y 283 d.C. También fue en China donde se construyó la primera esclusa, utilizando dos conjuntos de compuertas.

Los primeros canales de Occidente fueron tramos cortos, construidos para evitar obstáculos que impedían la navegación por los ríos. Más adelante, se construyeron canales para sortear ríos enteros, para prolongar la navegación desde un río hasta una ciudad, y para comunicar ríos, lagos y mares. El canal más largo es el que conecta el río Volga en Astraján con el mar Báltico en San Petersburgo, a casi 3.000 kilómetros de distancia.



El Gran Canal
Lo mismo que la Gran Muralla, el Gran Canal de China se fue construyendo por partes, a lo largo de muchos siglos. Dado que aprovecha segmentos de ríos y que ha sido reconstruido, agrandado y desviado en numerosas ocasiones, resulta imposible calcular su longitud exacta, pero una remodelación efectuada en el siglo XIII ofrecía un recorrido de 1.700 kilómetros. Su principal función consistía en facilitar la recaudación de impuestos, que se pagaban en arroz. En la actualidad, circulan por él barcos de hasta 2.000 toneladas, pero el tráfico habitual está formado por embarcaciones más pequeñas, como las que aquí se ven en Suzhou.



El canal de Suez
La idea de conectar el mar Rojo con el Mediterráneo se remonta a los tiempos de Herodoto (fallecido en 424 a.C.), que ya había escrito acerca de la construcción de un canal desde Suez hasta el Nilo. Aunque Napoleón encargó estudios con este fin, la idea permaneció en letargo hasta 1833, cuando hizo su aparición el futuro constructor, Ferdinand de Lesseps. Las dudas retrasaron el comienzo de las obras hasta 1860. Con ayuda de excavadoras mecánicas, se extrajeron casi tres millones de metros cúbicos de tierra, y en 1869 se inauguraba el canal, de 160 kilómetros de longitud. En el dibujo, Suez aparece en primer plano y Port Said al fondo.



El canal de Corinto
En el año 67, durante el reinado del emperador Nerón, se empezó a construir un canal para conectar los mares Egeo y Jónico, pero las obras se interrumpieron a la muerte del emperador, y no se reanudaron hasta 1882, bajo las órdenes de un ingeniero húngaro. Se protegieron con rompeolas los dos extremos, en los golfos de Corinto y de Egina, y se dragaron los accesos. El canal mide 6,5 km, con una profundidad media de 58 metros.

El plano inclinado de Ronquières
El canal que va de Bruselas a Charleroi cuenta con la estructura incorporada más grande del mundo: un plano inclinado de 1.600 metros de longitud, inaugurado en 1968, que asciende 68 metros, sobrepasando 28 esclusas y un túnel de 1.050 metros. Las barcazas se transportan arriba y abajo en tanques llenos de agua, capaces de llevar embarcaciones de hasta 1.350 t; cada tanque pesa de 5.000 a 5.700 toneladas.

Vías a través de un continente

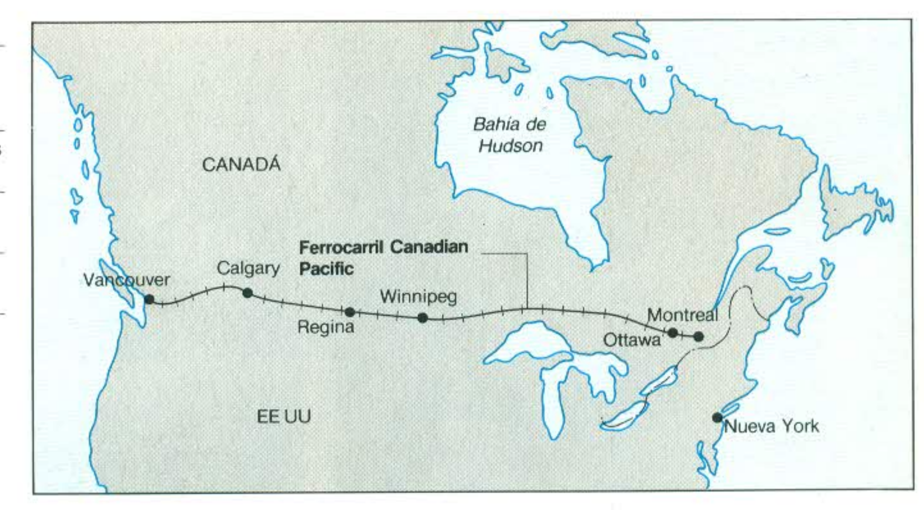
Datos básicos

Una de las mayores hazañas de la construcción ferroviaria.

Director general: Cornelius Van Horne.

Fecha de construcción: 1881-1885.

Longitud (Montreal-Vancouver): 4.700 km.



En 1871, el primer ministro de Canadá, el conservador John A. Macdonald, prometió a los colonos de la Columbia Británica un ferrocarril que los comunicara con el este, y prometió construirlo en diez años. Para su oponente liberal, Alexander Mackenzie, la promesa constituía «una insensatez irresponsable». Tal vez pecara de imprudente, pero Macdonald tenía un sueño: una Norteamérica británica que se extendiera de costa a costa, unida por una línea ferroviaria única. Estaba convencido de que sin el ferrocarril no sería posible crear la nación, ni se podría persuadir a la Columbia Británica de que ingresara en la nueva confederación formada por Ontario, Quebec, Nueva Brunswick, Nueva Escocia y Manitoba.

La empresa presentaba proporciones épicas. No sólo se trataba de un país inmenso y poco poblado, sino que además el ferrocarril tendría que atravesar algunos de los territorios más inhóspitos del planeta. Cuando Macdonald hizo su declaración, grandes zonas del noroeste estaban aún sin explorar. Sería preciso cartografiar y conquistar imponentes montañas e impenetrables pantanos. ¿Y de dónde iba a sacar una nación con sólo tres millones y medio de habitantes los 100 millones de dólares que se calculaba que costaría el proyecto?

Las cosas empezaron mal, con un escándalo financiero y la caída del gobierno de Macdonald. Durante la década de los setenta apenas se hizo nada, aparte de construir algunos ramales y comenzar a tender la línea principal en Fort William, Ontario. Pero en 1880 Macdonald recuperó el poder y se empezó a trabajar en serio. Al llegar la primavera de 1881, se habían resuelto los problemas financieros y comenzó la construcción en Portage La Prairie, al oeste de Winnipeg. En noviembre de aquel año, un notable personaje, Cornelius Van Horne, fue nombrado director general del Canadian Pacific, encargándosele la construcción del ferrocarril. Habían elegido a la persona adecuada, ya que Van Horne era un hombre dotado de inagotable energía, optimismo a toda prueba y considerable experiencia en cuestión de ferrocarriles.

Van Horne juró que tendería 800 kilómetros de vías en 1882 y que terminaría la construcción del ferrocarril en cinco años, la mitad del tiempo calculado por el gobierno. Contrató a 3.000 hombres y 4.000 caballos y empezó a tender raíles en la pradera, desde Flat Creek hasta Fort Calgary. En abril hubo inundaciones, en mayo nevadas, y a finales de junio la vía no había avanzado ni un metro.

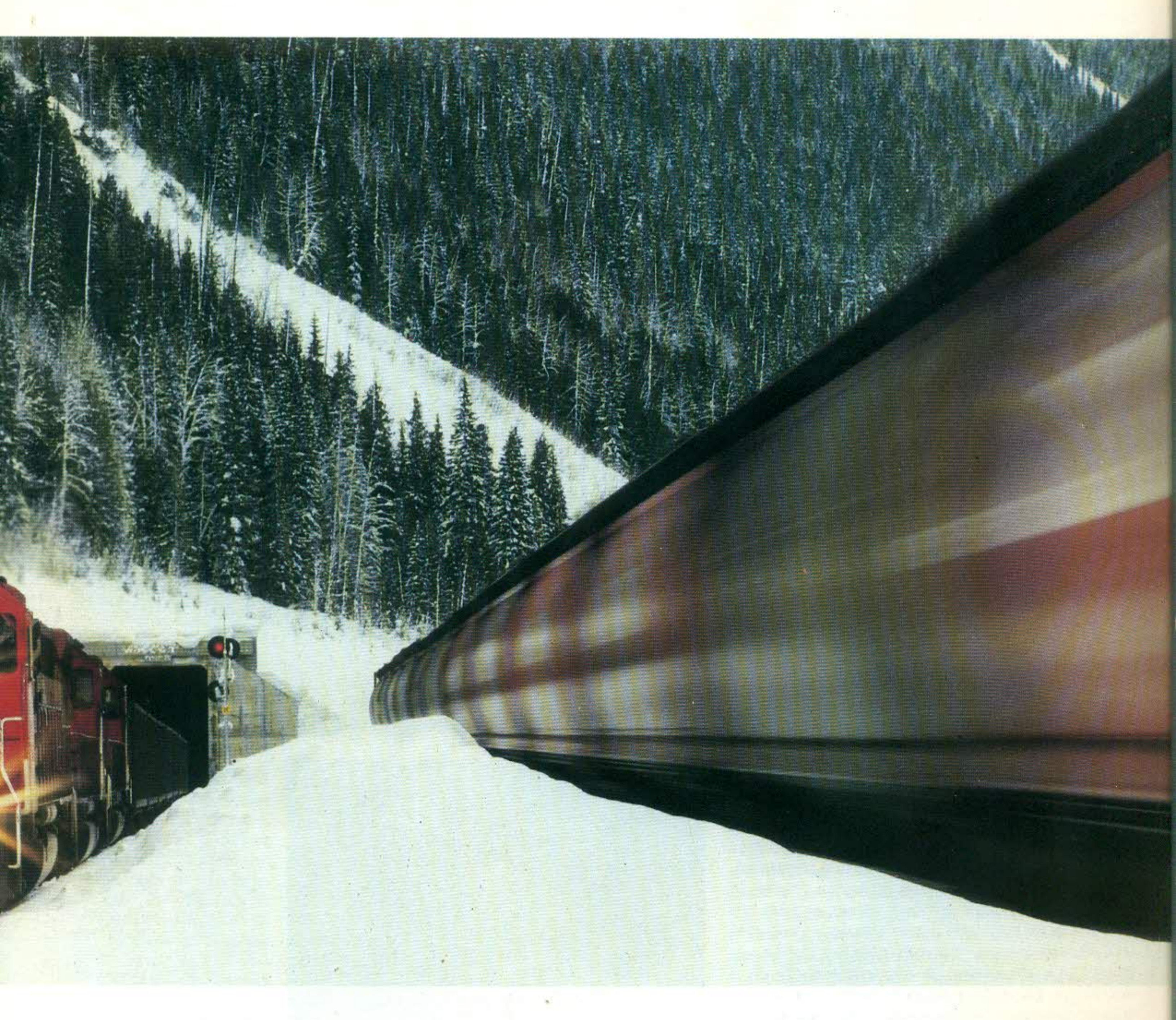
Cuando el público empezaba a manifestar serias dudas de que la empresa se llevara a cabo, comenzó un frenesí de construcción sin paralelo en toda la historia del ferrocarril. La línea fue extendiéndose a partir de Winnipeg. Cada día, 65 vagones descargaban al final de la vía los materiales necesarios para continuar el tendido al día siguiente. Por delante, las brigadas niveladoras iban allanando el terreno con excavadoras tiradas por caballos, mientras los pontoneros construían puentes de madera a través de ríos y arroyos, esforzándose al máximo para mantenerse por delante de los equipos que tendían los raíles.

Al llegar el invierno, Van Horne casi había cumplido su promesa: había construido 670 kilómetros de línea principal, 45 de vías muertas, y había preparado otros 30 kilómetros para tender vías al año siguiente. Pero, ¿a dónde se dirigía la línea? No resultaba fácil responder a esta pregunta en el invierno de 1882. Van Horne y sus hombres avanzaban tan a prisa como podían a través de la pradera, en dirección a una doble cadena de montañas —las Rocosas y las Selkirks—, sin conocer una ruta para franquearlas.

La tarea de encontrar una ruta se le había encomendado al comandante A. B. Rogers, un topógrafo cuya costumbre de maldecir a sus subordinados le había valido el apodo de «Campanas del



Túnel abierto cerca del paso de Rogers, que planteó constantes problemas a los primeros usuarios del CP. La muerte de 58 personas en 1910 a causa de una avalancha de nieve sobre las vías impulsó a construir el túnel de Connaught, que con sus 8 kilómetros de longitud es el mayor túnel de dos direcciones del continente. Desde un punto prominente del paso, Rogers pudo divisar 42 glaciares.



infierno Rogers». Era un hombre honrado, duro y ambicioso. Le habían prometido que si lograba encontrar un paso a través de las montañas que ahorrase al ferrocarril 240 kilómetros de desviación, recibiría una gratificación de 5.000 dólares y se le pondría su nombre al paso.

Rogers buscó una ruta a través de las montañas Rocosas y se decidió por el paso de Kicking Horse, que presentaba tremendas dificultades. Hasta los indios evitaban aquel paso, considerándolo demasiado peligroso para los caballos. Además, había que encontrar una salida por el oeste, y parecía imposible trazar una ruta a través de las Selkirks. Por fin, tras varias expediciones que estuvieron a punto de perecer al agotarse las provisiones, Rogers atravesó los bosques de abetos y llegó a unas praderas de altura en las que nacían arroyos que corrían en direcciones opuestas. Había encontrado una ruta que sus detractores no vacilaron en considerar impracticable. El paso recibió su nombre y Rogers su cheque de 5.000 dólares, aunque nunca lo hizo efectivo, ya que prefirió colgarlo en la pared de su casa.

Kicking Horse resultó practicable, pero a duras penas. A estas alturas, comenzó a escasear el dinero y no quedó más remedio que economizar. El contrato con el gobierno estipulaba que la pendiente máxima en cualquier punto de la línea no debía superar el 2,2 por 100. Para conseguir esto en Kicking Horse habría sido necesario excavar un túnel de 425 metros de longitud, que habría retrasado las obras un año, así que se decidió tender una línea «provisional» que bajaba desde la cima hasta el valle con una pendiente doble de la permitida y cuatro veces mayor que la máxima deseable. Esta bajada era la famosa «gran cuesta»,

Vías a través de un continente



Un tren CP en 1900. Viajar montado en el parachoques de la locomotora estaba considerado como la mejor manera de disfrutar del espectacular paisaje que los trenes atraviesan por el oeste; en 1901, la comitiva del futuro rey Jorge V y la reina María viajó de este modo, bien abrigada con mantas de viaje, durante un tramo próximo a Glacier, en la Columbia Británica.

de 13 kilómetros de longitud, que durante 25 años aterrorizó a maquinistas y pasajeros.

El primer tren que intentó bajar la gran cuesta descarriló y cayó al río, causando la muerte a tres hombres. Se instalaron desviaciones de seguridad, atendidas día y noche. El tren tenía que detenerse en cada una de ellas y cambiar de agujas para seguir por la vía principal. En lo alto de la cuesta, el tren se detenía para comprobar los frenos. La velocidad máxima permitida en la bajada era de 9 kilómetros por hora, y los empleados bajaban del tren de cuando en cuando para asegurarse de que las ruedas no se atascaban. La subida era igual de difícil: se necesitaban cuatro locomotoras grandes para arrastrar un tren de pasajeros de 11 vagones y 710 toneladas. Hasta 1909 no se logró suprimir este peligroso tramo, mediante el sistema de construir dos túneles en espiral a través de la montaña, por los que el tren podía descender con suavidad, describiendo círculos completos.

Igualmente dificultoso resultó el tendido de la línea a lo largo de la orilla norte del lago Superior. La roca —granito con vetas de cuarzo— era muy dura, los inviernos crudísimos y los veranos insoportables a causa de las moscas. Se necesitó tanta dinamita para abrir camino que Van Horne hizo instalar tres fábricas, cada una de las cuales producía una tonelada diaria. En el verano de 1884 había 15.000 hombres trabajando en este tramo de la línea, cuyos salarios ascendían en total a 1.100.000 dólares al mes. En invierno se necesitaban 300 trineos de perros, trabajando sin parar, para aprovisionar a los equipos.



Donald A. Smith, el mayor de los cuatro directivos del CP presentes en el acto, introduce el último clavo en el paso de Eagle, el 7 de noviembre de 1885. El caballero corpulento que se encuentra a su lado es Van Horne, director general del CP, cuyo secreto, según confesión propia, era: «Como todo lo que puedo; bebo todo lo que puedo; y nadie me importa un pito.» El hombre con barba blanca situado entre los dos es sir Sanford Fleming, que en 1862 planteó al gobierno el primer plan de construcción de un ferrocarril hasta el Pacífico. Smith dobló el primer clavo.

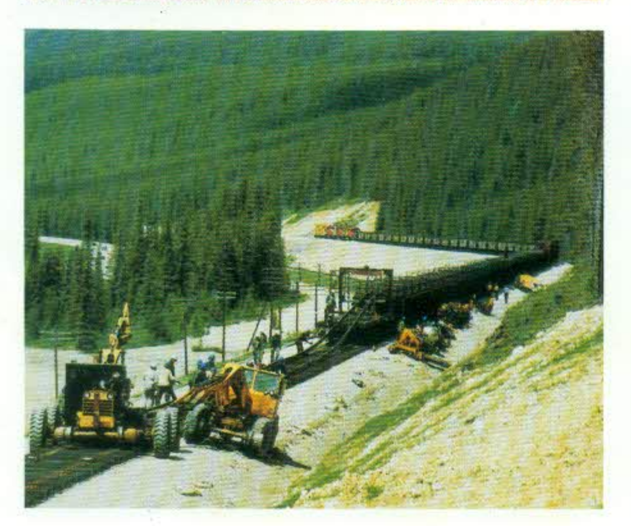
A comienzos de 1885, la línea estaba casi terminada, pero lo mismo sucedía con el dinero. Hasta que los trenes empezaran a circular, no se dispondría de ingresos para hacer frente a los tremendos gastos. El gobierno se negó a intervenir y la catástrofe financiera parecía inevitable. Pero a finales de marzo, cuando todo parecía perdido, un levantamiento de colonos blancos en el noroeste salvó la situación. Había que enviar 3.300 soldados para sofocar la rebelión, y el único medio para que llegaran a tiempo era el ferrocarril inconcluso. Van Horne prometió transportar a las tropas hasta el noroeste en diez días, supo-



Un moderno tren transcontinental atraviesa el puente de Stoney Creek, en la larga subida al paso de Rogers. Este arco de acero de 102 metros, construido en 1893 y reforzado en 1929, sustituyó a un viaducto de caballetes levantado durante el tendido de la línea. En 1990, las reducciones de gastos impuestas por el gobierno pusieron fin a lo que, para muchas personas, era el viaje en tren más espectacular del mundo.



Los campos de trigo de Manitoba no plantearon dificultades para el tendido de las vías. Los equipos levantaron un terraplén de 1,20 m a través de la pradera, con zanjas de 18 metros de anchura a cada lado, para evitar que la vía quedara bloqueada por la nieve.



El tendido de raíles con soldadura autógena cerca del lago Louise, en Alberta, no guarda ningún parecido con las penosas condiciones en que se construyó la línea, aunque en un día bueno se podían tender hasta 8 kilómetros de vías. El salario de los trabajadores oscilaba entre un dólar y dólar y medio por una jornada de 10 horas. Su dieta consistía en carne de cerdo salada, cecina de vaca, melaza, judías, gachas de avena, patatas y té.

niendo acertadamente que ningún gobierno podría negarse a ayudar a un ferrocarril que le había ayudado a aplastar una rebelión.

El viaje fue una pesadilla. Los soldados tuvieron que viajar en vagones de mercancías, y utilizar trineos tirados por caballos para recorrer los tramos no terminados, bajo un frío intenso y fuertes nevadas. Pero llegaron a tiempo de sofocar la revuelta. Aun así, el gobierno se negó a cooperar hasta que la quiebra pareció inminente.

El 10 de julio de 1885, mientras el Parlamento se reunía para discutir la concesión de ayuda, uno de los acreedores del Canadian Pacific exigió por vía de apremio el pago de una deuda de 400.000 dólares. El pago debía efectuarse a las tres de la tarde; a las dos, la Cámara de los Comunes votó a favor de la concesión de más fondos. El ferrocarril estaba salvado.

El último clavo se puso en el paso Eagle una fría mañana de noviembre. Todos los impulsores del ferrocarril, que habían llegado al borde de la ruina para hacerlo realidad, estaban allí para verlo terminado. Se oyeron aclamaciones y el agudo silbato de una locomotora. Van Horne, requerido para pronunciar un discurso, no dijo más que unas pocas palabras: «Lo único que puedo decir es que ha sido un buen trabajo, en todos los aspectos.» Entonces sonó de nuevo el silbato y una voz exclamó: «¡Todos al tren!»

Raíles en la taiga

Pocos ferrocarriles se han construido en condiciones tan difíciles y en medio de tanta confusión como la larga línea que recorre los 9.500 kilómetros que separan Moscú de Vladivostok, atravesando las desoladas tierras de Siberia. Tras numerosos comienzos frustrados, y a pesar de la insistencia del zar Alejandro III, que en 1886 declaró: «¡Ya va siendo hora!», la construcción no se inició hasta mayo de 1891 en el extremo oriental, y un año después en el occidental. Y si pudo comenzar fue gracias al empeño de Sergius Witte, un entusiasta de los ferrocarriles que fue nombrado ministro de Finanzas y que, mediante ingeniosas estratagemas financieras, logró revitalizar la depauperada economía rusa y reunir el dinero necesario para el ferrocarril.

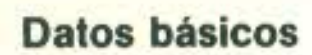
La construcción de la línea se dividió en varias secciones, bajo la dirección de diferentes ingenieros. La sección más occidental, que empezaba en Cheliabinsk, discurría casi en línea recta durante casi 1.500 kilómetros, a través de llanuras sin accidentes, pero no había árboles para hacer traviesas y sólo se podía trabajar al aire libre durante cuatro meses al año.

Las excavaciones se hacían con pico y pala; y para ahorrar dinero, las traviesas estaban más espaciadas que en Europa o Norteamérica y los raíles se hicieron con un acero mucho más ligero. Apenas se utilizaba balasto para asentar la vía, y en muchos lugares se tendían las traviesas directamente sobre la tierra. A pesar de los problemas, se avanzó con rapidez, tendiendo una media de 4 kilómetros diarios de vías en verano. Los primeros 800 kilómetros de la sección occidental se inauguraron en septiembre de 1894. En agosto de 1895, la línea había llegado al Obi, uno de los ríos más largos de Siberia.

Los equipos construían puentes sobre la marcha: estructuras de madera sobre los arroyos y ríos pequeños, y construcciones más sólidas, de piedra y acero, sobre los ríos caudalosos como el Obi y el Yeniséi. Hicieron un buen trabajo, como demuestra el hecho de que muchos de los puentes de acero aún se mantienen en pie, a pesar de sufrir cada primavera el impacto de miles de toneladas de hielo contra sus pilares de piedra, cuando comienza el deshielo. El frío se cobró innumerables vidas, ya que los obreros trabajaban apenas sin protección, a unos treinta metros de altura sobre las aguas congeladas, y a veces se quedaban tan agarrotados que no podían agarrarse a los asideros y caían al hielo. Muchos de los albañiles eran italianos, que ganaban 100 rublos al mes.

El acero fundido para los puentes se traía de los Urales, el cemento de San Petersburgo, los cojinetes de acero de Varsovia, y todo llegaba por la vía recién tendida, con lentitud desesperante. En ocasiones, antes de construir los puentes, se tendían los raíles directamente sobre el hielo, regándolos para que se congelaran y quedaran fijos en

Datos básicos



La vía férrea más larga del mundo.

Fecha de construcción: 1891-1904.

Longitud: 9.500 km.

Duración del viaje: 170 horas.

Regiones horarias atravesadas: siete.



El bosque, aparentemente interminable, por el que discurre gran parte del recorrido, visto al este de Krasnoyarsk, donde el ferrocarril cruza el río Yeniséi por un viaducto de 925 metros y seis ojos. Abajo, el emblema de los ferrocarriles soviéticos y una tablilla que indica «Moscú-Vladivostok». Durante mucho tiempo, los viajeros occidentales no pudieron utilizar esta línea.

su sitio. Los escasos pasajeros se apeaban y cruzaban a pie, mientras el maquinista ponía a prueba la resistencia del hielo haciendo pasar el tren por encima.

Mientras tanto, otros equipos habían empezado a trabajar en el centro de Siberia, donde la tarea de hacer pasar un ferrocarril a través de la taiga virgen resultaba aún más difícil. Hubo que abrir un pasillo de 75 metros de anchura a través del bosque, para reducir el peligro de incendio a causa de las chispas, y tender los raíles sobre un terreno que permanecía helado hasta julio, para convertirse entonces en un pantano intransitable. En 1895 había 66.000 hombres trabajando en este tramo, que quedó terminado a mediados de 1898, dos años antes de lo previsto.

Pero todavía faltaba la sección más difícil de todas: un tramo de 260 kilómetros a lo largo de la orilla sur del lago Baikal. Como su construcción habría tardado varios años, se decidió que los trenes pasaran a través del lago, una de las mayores masas de agua dulce del mundo. Se importaron transbordadores rompehielos construidos en el río Tyne, Inglaterra, que se transportaron desmontados hasta Siberia para volverlos a montar allí. La construcción comenzó en 1899 y terminó a toda prisa en 1904, al estallar la guerra entre

Raíles en la taiga

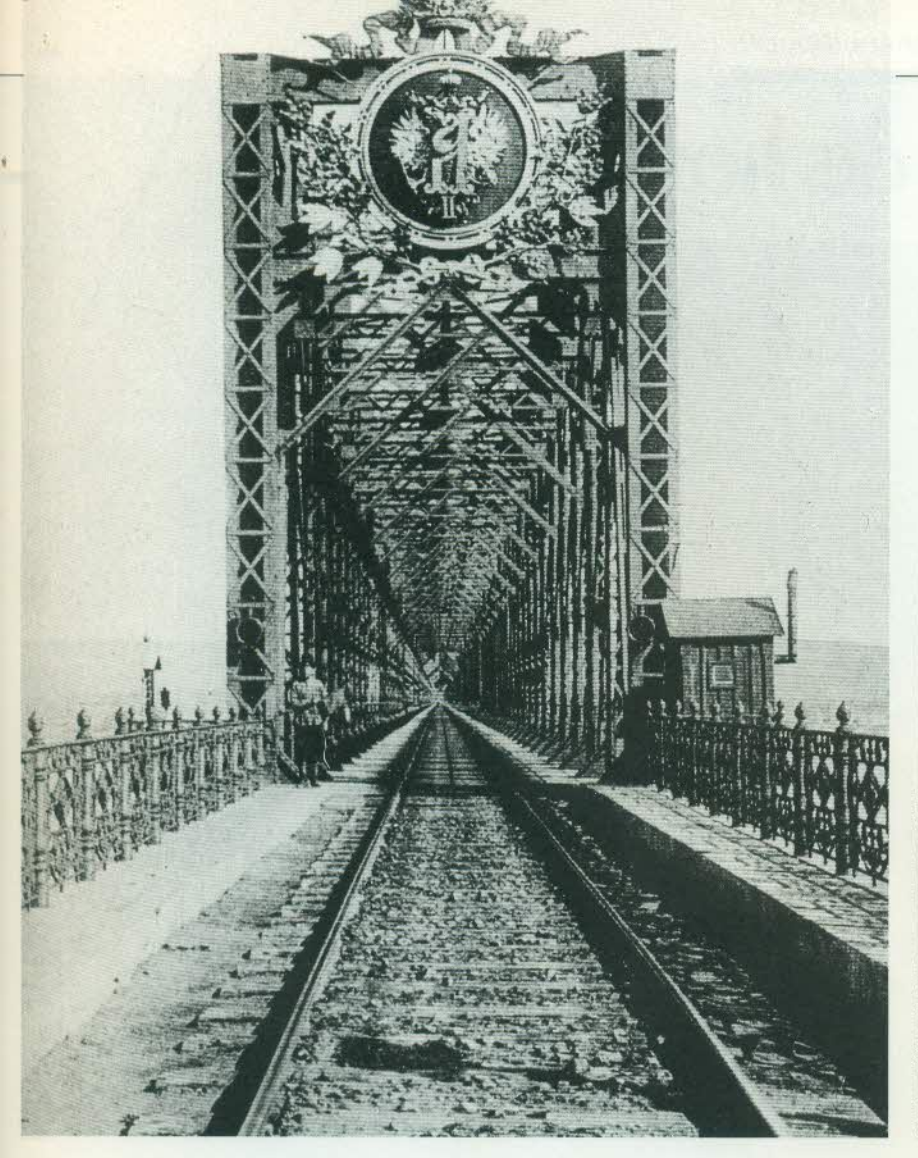
Rusia y Japón. El trabajo se realizó con tanto apresuramiento que el primer tren que recorrió la línea descarriló diez veces. Pero el 25 de septiembre de 1904 se inauguró la línea y, por primera vez, se pudo viajar desde la costa atlántica de Europa hasta las costas orientales de Asia en un trayecto sin interrupciones. Las obras habían durado 13 años y 4 meses, y habían costado 250 millones de dólares.

En la actualidad, el trayecto desde un extremo a otro de la línea dura ocho días, y tiene 97 paradas. A pesar del triunfo que representó su construcción, y de su importancia estratégica y económica, los viajes en el Transiberiano nunca han sido tan lujosos como los de trenes europeos como el Oriente Exprés, ni tampoco resultan especialmente interesantes. El paisaje se repite día tras día, sin variación aparente. La comida es un desastre: un escritor recuerda haber pasado una semana sin comer nada más que sémola y una especie de tortilla. Y tampoco se ha librado de los accidentes: en junio de 1989 se produjo en esta línea el accidente ferroviario más grave de la historia, cuando un gaseoducto reventó a 1.200 kilómetros de Moscú, y el gas líquido hizo explosión al pasar dos trenes cargados de pasajeros, provocando la muerte de más de 800 personas.

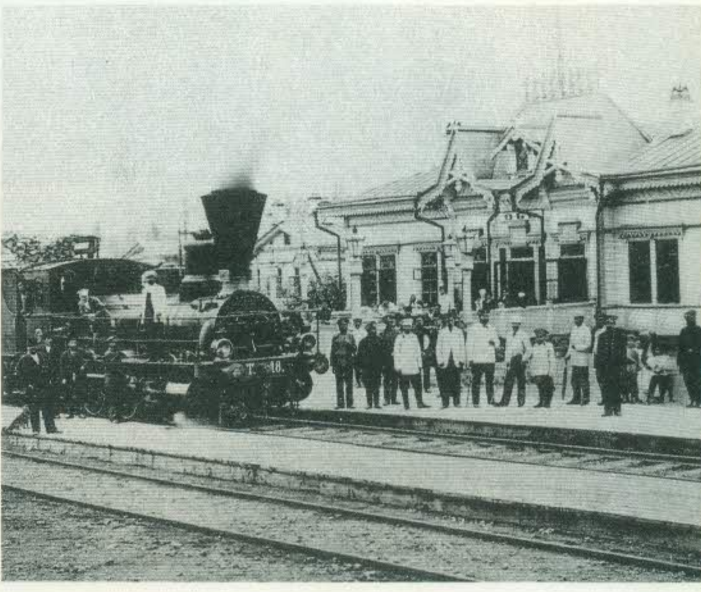
En el tendido de la línea trabajaron obreros turcos, persas e italianos, e incluso los presos de un penal próximo a Irkutsk, a los que se prometió un año de reducción de condena por cada ocho meses de trabajo.



Este paso abierto cerca del lago Baikal explica por qué el tramo de línea que pasa junto al lago fue el último en terminarse. Fue preciso abrir 40 túneles y numerosos cortes como éste en la roca.



El escudo imperial de Nicolás II adorna la entrada al viaducto que cruza el Volga entre Sizran y Samara.



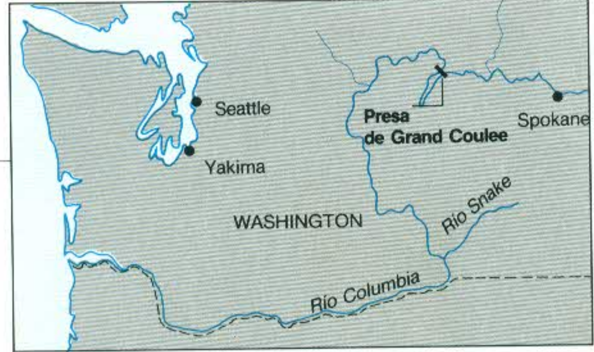
La estación de Obi, al oeste de Novosibirsk, decorada con guardamalletas. Al principio, la baja calidad del tendido obligaba a los trenes a viajar despacio. El expreso de Siberia tenía una velocidad media de 32 km/h.



Las comodidades que disfrutaban los pasajeros en los primeros tiempos del Transiberiano oscilaban desde las propias de un tren de lujo venido a menos hasta viajar en vagones de mercancías modificados (izquierda), aunque esto último solía quedar reservado para presos, deportados a Siberia y tropas militares.

Un coloso de hormigón





Datos básicos

Cuando se concibió, era el proyecto hidroeléctrico más grande del mundo.

Constructores: Mason-Walsh-Atkinson-Kier Co.

Fecha de construcción: Iniciada en 1933.

Material: Hormigón.

Altura: 167 m.

Longitud: 1.270 m.



La presa de hormigón más grande del mundo —en realidad, la estructura de hormigón más grande del mundo— se encuentra en el río Columbia, en el estado de Washington. Es, además, una de las mayores centrales de energía hidroeléctrica del planeta, y sus gigantescas bombas de irrigación serían capaces de dejar secos casi todos los ríos de los EE UU. Su construcción en una zona aislada y poco poblada, durante los años de la Depresión, representó uno de los mayores logros del Departamento de Obras Públicas.

La presa tenía dos propósitos (tres, si se incluye la creación de puestos de trabajo): el principal consistía en proporcionar agua para regar más de 400.000 hectáreas de territorio desértico —Grand Coulee, o la Gran Cañada—, en el centro del estado de Washington, una tierra potencialmente fértil, que sólo necesitaba agua para volverse productiva. Solía decirse que hasta las liebres tenían que llevarse el almuerzo y una cantimplora de agua para atravesar la Gran Cañada, y la zona estaba salpicada de granjas deshabitadas, molinos de viento descompuestos y equipo agrícola abandonado. El segundo propósito consistía en generar electricidad, parte de la cual se emplearía para hacer funcionar las bombas de irrigación.

La geología había creado el emplazamiento ideal para la presa. Hace millones de años, un glaciar que avanzaba hacia el sur desde Canadá había bloqueado el curso del río Columbia, obligándole a fluir por un nuevo cauce. Antes de que el glaciar se retirase y permitiese recuperar el curso original, el río había tenido tiempo de erosionar su nuevo cauce hasta excavar un canal de 275 metros de profundidad y 8 kilómetros de anchura. Este canal es la Gran Cañada, que quedó seca en toda su longitud.

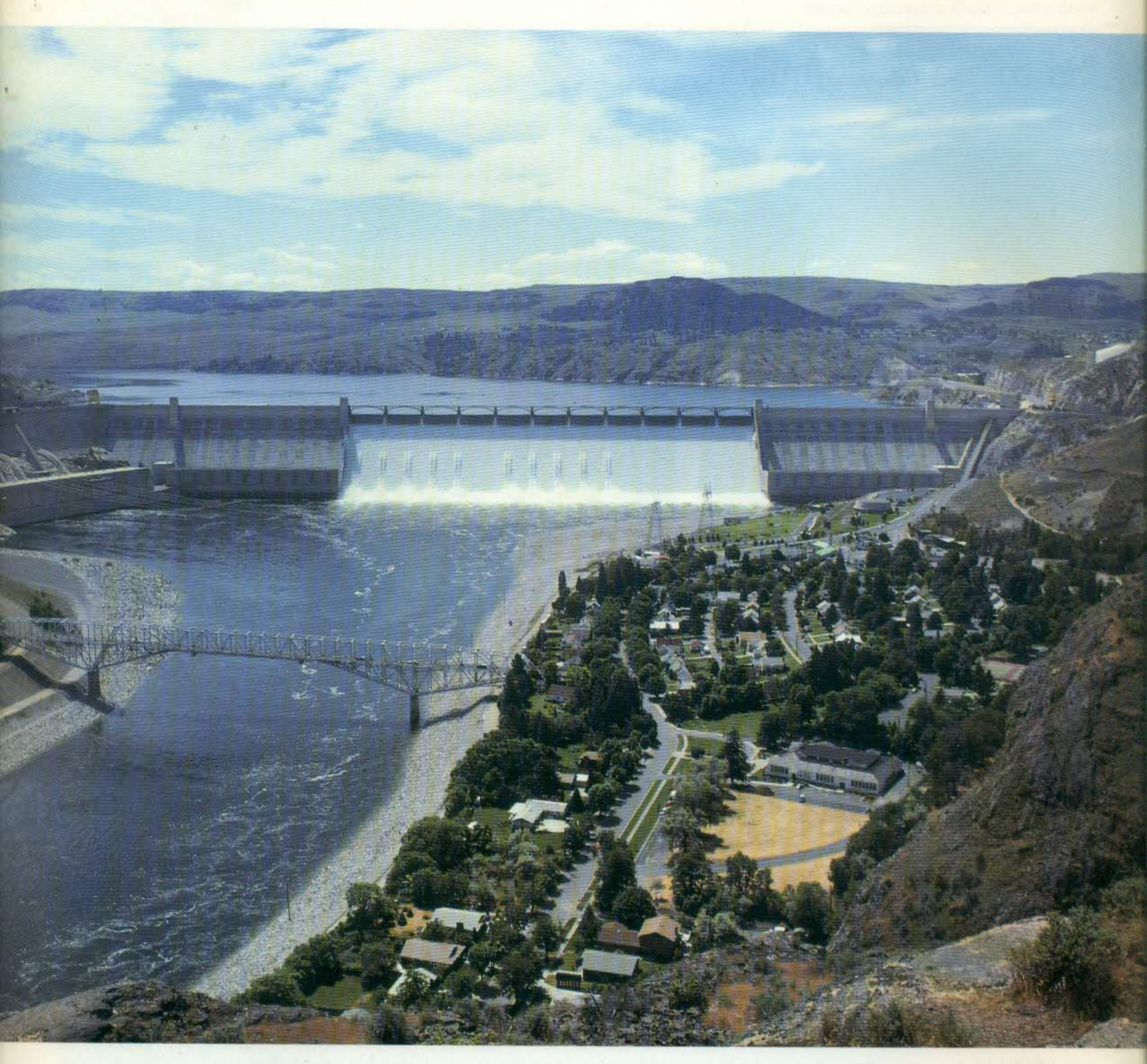
El proyecto de Grand Coulee tenía por objeto construir una enorme presa de hormigón en el nuevo curso del río, creando un lago de 240 km de longitud en dirección a Canadá, y dos presas de tierra más pequeñas en el propio Grand Coulee, para convertirlo en un embalse de irrigación. Como el glaciar había elevado el nivel del río, el embalse de Grand Coulee se encuentra a unos 90 metros por encima del nivel máximo del agua en el lago de más abajo, de manera que se necesitan bombas para subir el agua hasta él.

La presa principal tiene unas dimensiones extraordinarias: 1.270 metros de longitud y 167 de altura, tan alta como un edificio de 46 pisos. En su construcción se emplearon 8.400.000 metros cúbicos de hormigón, que elevaron el nivel del río 106 metros. Depende por completo de su masa para soportar la presión del agua, ya que el río era demasiado ancho para construir una presa arqueada. Los trabajos de ingeniería preliminares comenzaron en 1933, y la primera contrata se concedió a finales del mismo año.

Para poder construir la presa sobre cimientos sólidos, se construyeron cajas-dique provisionales, hechas con pilotes de acero y madera, para estrechar la anchura del río y dejar al descubierto el fondo de roca. Se construyeron dos cajas-dique en forma de U, una a cada lado del río, dejando un espacio de tan sólo 150 metros para que pasara el río. Se extrajo el agua del interior de las cajas-dique por medio de bombas y se dejó al descubierto la roca. Una vez secas estas zonas, se construyó la presa de hormigón, empezando por las orillas y progresando hacia el centro, y dejando algunas partes bajas para permitir el desagüe. A continuación, se construyeron otras dos cajas-dique, una encima y otra debajo de la presa, desviando el río por los desagües para poder desecar la parte central del cauce y construir los últimos 150 metros de la presa.

El hormigón se vertía en una serie de columnas de 15 × 15 metros, que ascendían desde el lecho de roca hasta lo más alto de la presa. Las columnas iban creciendo de metro y medio en metro y medio, dejando transcurrir 72 horas para que fraguase el hormigón antes de verter más.

Al fraguar, el hormigón genera calor en una reacción química. Si no se deja escapar este calor, una estructura de hormigón de gran tamaño irá aumentado de temperatura durante meses y se dilatará. Al concluir el fraguado y disminuir la temperatura, el hormigón se contraerá, formándose grietas. Para evitar que esto suceda, se inser-



taban en el hormigón tuberías especiales de refrigeración, hechas con tubos de acero de 2,5 cm de grosor y paredes finas, haciendo pasar agua fría por su interior.

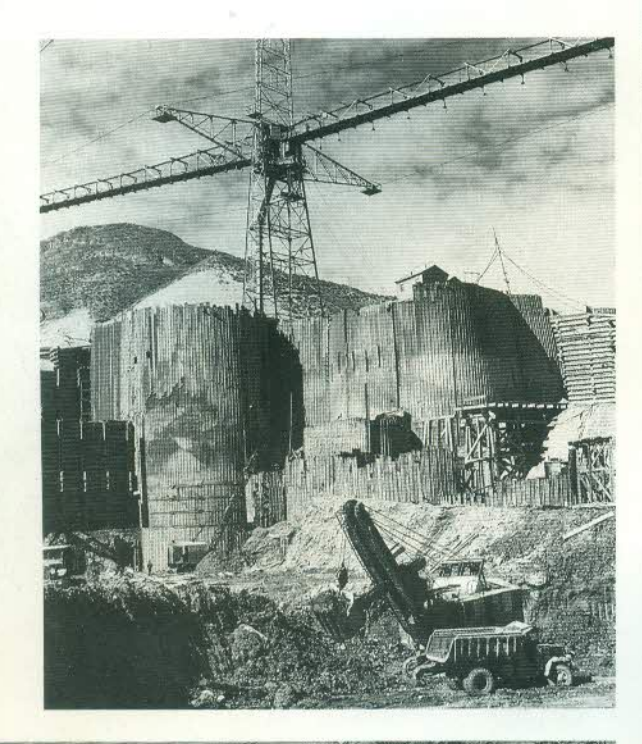
Una vez fraguadas y frías las columnas de hormigón, se rellenaron los pequeños espacios que quedaban entre ellas por efecto de la contracción, bombeando lechada de cemento a través de una red de tubos embutidos en el hormigón en el momento de verterlo.

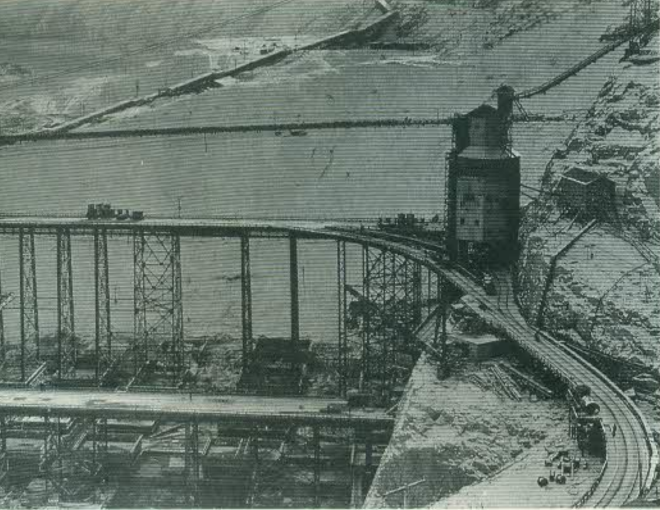
La contracción experimentada entre cada dos bloques era muy pequeña —menos de 2 mm—, pero en toda la longitud de la presa esto sumaba unos 20 centímetros. La lechada de cemento selló los huecos, haciendo impenetrable la presa.

Durante la construcción de la presa surgió un problema imprevisto, que se resolvió de un modo insólito. En el extremo oriental de la presa, nada más descubrir el lecho de roca, éste volvía a quedar cubierto por grandes cantidades de arcilla plástica, que brotaba de las paredes sin que fuera posible contenerla. Se instalaron contenciones de madera y hormigón, pero no sirvieron de nada. El volumen de la arcilla ascendía a más de 150.000 metros cúbicos, y extraerla habría resultado lento y costosísimo. Por fin, a los ingenieros se les ocurrió la idea de congelar el frente de la arcilla, formando una presa que contuviera el res-

La presa de Grand Coulee es la principal. La de la izquierda, más corta y situada en ángulo, es la presa de Forebay. Detrás de la presa, el lago se extiende a lo largo de 245 km hacia la Columbia Británica, con una anchura media de 1.220 m y una profundidad de 115 m, y se ha convertido en un nuevo refugio para la vida silvestre.

Un coloso de hormigón





La tierra extraída del lado oriental se transportaba a 1.200 metros de distancia por medio de una correa de transmisión (arriba) que cruzaba el río y la llevaba al cañón de la Serpiente de Cascabel (Rattlesnake Canyon), donde se depositaron 10 millones de metros cúbicos de tierra. El cemento procedía de cinco fábricas del estado de Washington, y se guardaba en silos de acero.

to. Se instaló una tubería de 4,8 kilómetros en forma de arco, en la base de la masa de arcilla, y se hizo circular por ella agua salobre a cero grados de temperatura. Con esto se consiguió congelar un arco de arcilla de 6 metros de espesor, 14 de profundidad y 33 de longitud.

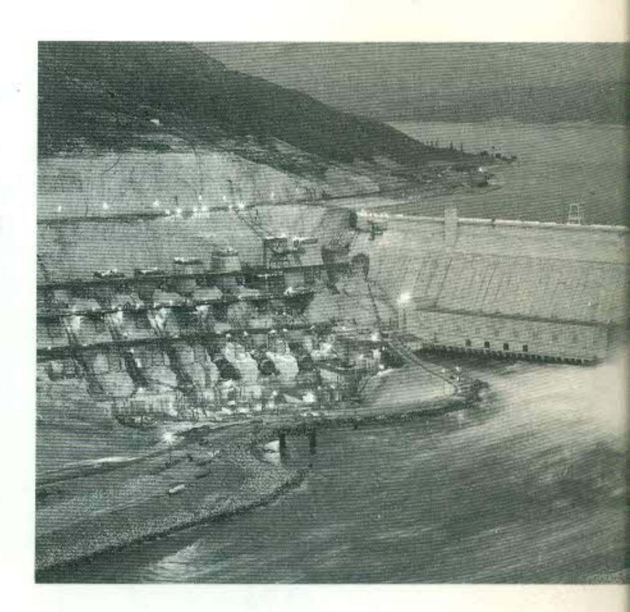
Entre agosto de 1936 y abril de 1937, una fábrica de hielo mantuvo congelada la arcilla mientras se preparaba el lecho de roca y se iba levantando la presa hasta superar el nivel de la arcilla. Una vez conseguido esto, se interrumpió el suministro de hielo y se permitió que la arcilla volviera a moverse. La operación había costado 35.000 dólares, pero ahorró una cantidad muy superior.

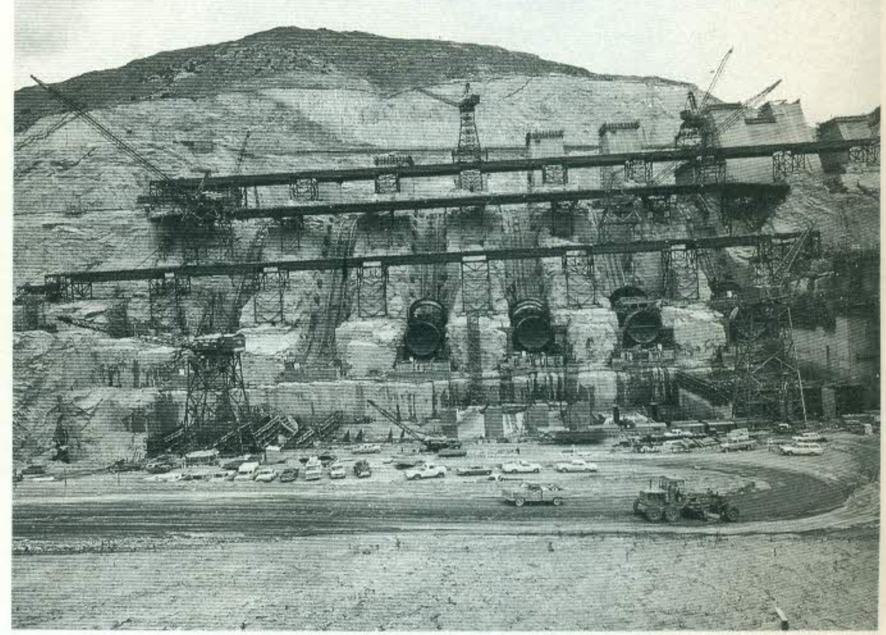
El lago creado por la presa contiene agua suficiente para abastecer a cada ciudadano de los EE UU con 75.000 litros al año, pero el caudal del río Columbia es tan abundante que podría llenar el lago en dos meses (o en un mes, en época de crecidas). En ambas orillas del río se construyeron sendas estaciones hidroeléctricas, que en un principio generaban un total de 1.920 megavatios. Esta energía se utiliza para hacer funcionar 12 bombas instaladas en la orilla oeste del río, detrás de la presa. Cada una de estas bombas posee una capacidad de 45.300 litros por segundo, suficiente para regar 48.500 hectáreas de tierra.

Las bombas hacen pasar el agua a conductos de 4 metros de diámetro, que la llevan hasta el embalse superior, en lo alto de Grand Coulee, que se creó levantando dos presas de tierra de unos 30 metros de altura, una a poco más de 3 kilómetros



La presa de Forebay en 1971, durante la primera fase de su construcción, en el extremo occidental de la presa de Grand Coulee (derecha). En la fotografía de abajo se aprecia la construcción de los seis tubos de carga que llevan agua a las turbinas. Tienen un diámetro de 12 metros, más del doble que los de la central hidroeléctrica original. Cada tubo de carga está formado por secciones cilíndricas, que se hicieron bajar mediante raíles y se soldaron in situ.





Se construyeron dos caballetes (arriba), de 915 m de longitud cada uno, para instalar el hormigón en las columnas. Por estos caballetes se desplazaban las grúas, con brazos de más de 35 m, para recoger los recipientes, que llegaban desde las hormigoneras por tren. Los recipientes se abrían por el fondo y el hormigón se podía instalar a razón de 1 m³ cada cinco segundos y medio.

de la presa de Grand Coulee, y la otra cerca de Coulee City. Entre estas dos presas se formó un embalse de 43 kilómetros de longitud, que se llenó de agua bombeada desde el gran lago, situado 100 metros más abajo. Desde aquí, el agua fluye unos 16 kilómetros, hasta las entradas de dos canales, el canal oriental, de 240 kilómetros, y el occidental, de 160 kilómetros. De estos canales salen otros, laterales y más cortos, que distribuyen el agua por los campos de la región.

En 1970 se puso en marcha un nuevo plan para aumentar el rendimiento de las centrales hidroeléctricas, que incluía el desmantelamiento de unos 75 metros de presa por el extremo oriental, y la construcción de una nueva presa, conectada a la primera y formando un ángulo corriente abajo. Las nuevas turbinas están incorporadas a esta presa, lo cual resultaba más fácil que desarmar la antigua presa para cambiar las turbinas instaladas en los años treinta. Para desmantelar el extremo de la presa original, se construyó primero una caja-dique para aislarlo, y luego se demolió con cuidado, bloque a bloque, utilizando dinamita.

Al mismo tiempo, se iban construyendo tubos de carga —grandes tubos que llevan el agua hasta las turbinas— un poco más abajo de donde se levantaría la nueva sección de la presa. Cuando se haya completado el proyecto, el rendimiento de la planta hidroeléctrica ascenderá a 10.080 megavatios. Sólo existe en el mundo una central hidroeléctrica que supere esta producción: la central de Itaipu, en el río Paraná, entre Brasil y Paraguay.

Controlando la fuerza del agua

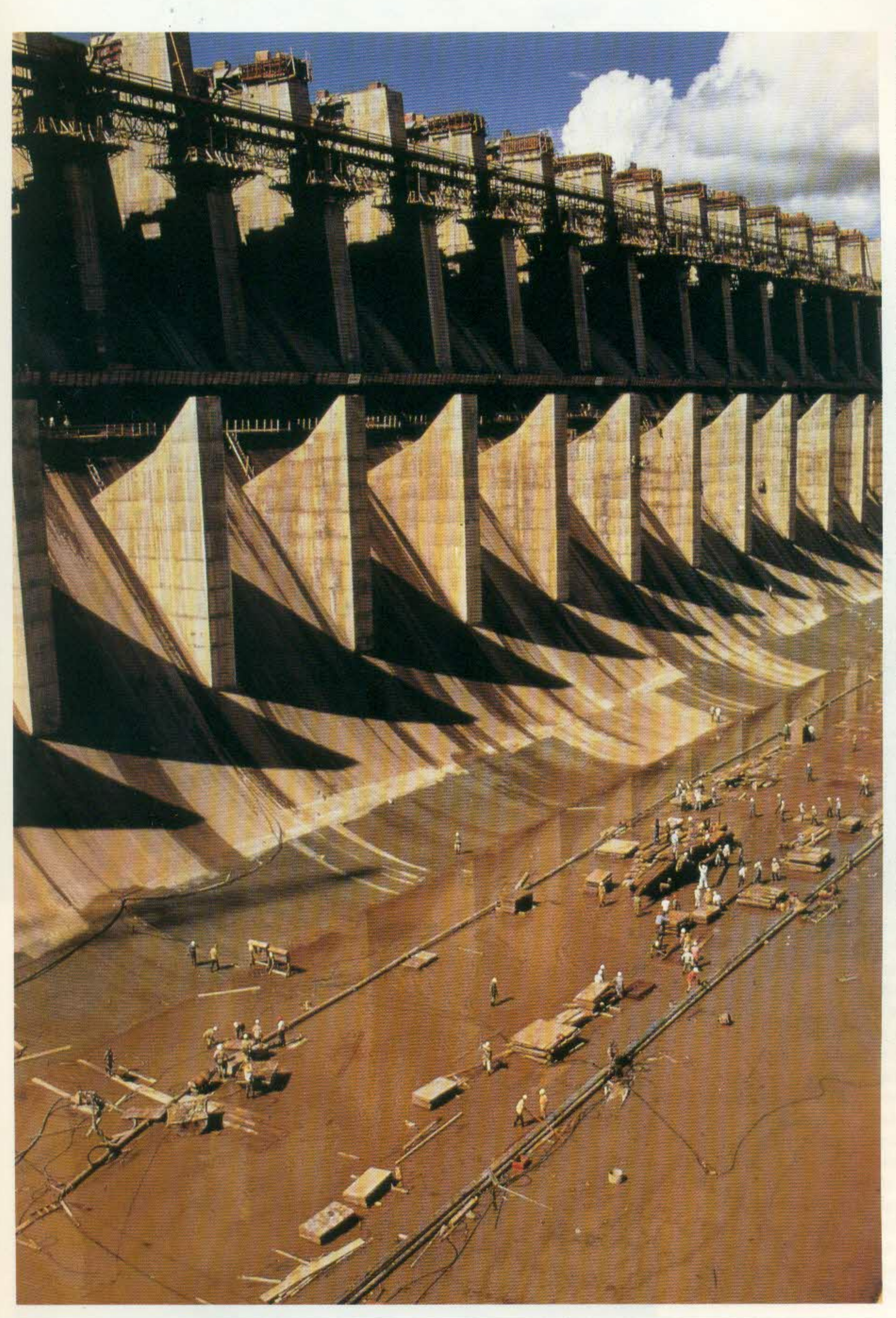
La presa más antigua que se conoce consistía en una serie de parapetos de tierra revestidos de piedra, construidos en Jawa, Jordania, hacia el año 3200 a.C. También en los valles del Tigris y el Éufrates se construyeron presas de tierra para regar los campos, pero la primera presa de piedra que se conoce se construyó cerca de Homs, Siria, hacia el 1300 a.C. El arte de la construcción de presas se extendió a la India, Ceilán y Japón. La primera presa en forma de arco, cuya resistencia se basa en el mismo principio que los puentes de arco, se construyó en la frontera de Turquía con Siria, durante el reinado de Justiniano I.

En el siglo XX, la generación de energía hidroeléctrica ha pasado a convertirse en el principal motivo para construir presas. El pionero de este proceso fue sir William Armstrong, cuya residencia de Northumberland fue la primera casa del mundo que obtuvo luz por este método.



Presa de Kielder, Inglaterra
El terraplén de la presa de Kielder, la más grande de Gran Bretaña, mide 1.140 metros de longitud y está formado por casi cinco millones de metros cúbicos de tierra. Algunas presas despiertan oposición por ocasionar la pérdida de tierras rurales, pero la de Kielder ha recibido elogios por su respeto al paisaje. El embalse, de más de mil hectáreas, abastece de agua a gran parte del nordeste de Inglaterra.

Presa de Tucurui, Brasil
Las presas pueden alterar de manera radical grandes territorios, como demuestra esta presa construida en el río Tocantins, con un coste de 4.000 millones de dólares. El embalse, de 64 millones de metros cúbicos, transformó el río en una cadena de lagos de 1.900 km de longitud. Las instalaciones hidroeléctricas proporcionan cerca del 20 por 100 de la electricidad del mundo. Uno de los pioneros de este campo fue el ingeniero británico Charles Parsons, que en 1884 inventó la turbina de vapor.



Presa de Itaipu, Brasil
La central hidroeléctrica de Itaipu, construida en el río Paraná, en la frontera de Paraguay con Brasil, costó 11.000 millones de dólares y empezó a generar energía en octubre de 1984. Las 18 turbinas de la presa son capaces de generar 13.320 megavatios, lo cual la convierte en la central más potente del mundo, aunque existe un proyecto para construir una presa mucho más potente en el río Tunguska, en la CEI. En Brasil, los proyectos hidroeléctricos han tenido que enfrentarse a una fuerte oposición, que considera dichos proyectos como verdaderos desastres ecológicos y se opone a los créditos internacionales que los financian. Uno de los proyectos más ambiciosos de Brasil, el Plan 2010, contempla la construcción de 136 presas para abastecer de electricidad a Brasil durante las dos próximas décadas. Esto implicaría inundar una zona del tamaño del Reino Unido, y desplazar a 250.000 indígenas de las selvas en las que viven.

La lucha contra el mar





Datos básicos

La barrera contra el mar más grande del mundo.

Fecha de construcción: 1958-1986.

Materiales: Hormigón premoldeado y acero.

Longitud: 2.500 m en el Escalda oriental.

Los Países Bajos hacen honor a su nombre. Durante nueve siglos, el pueblo holandés ha luchado contra las inundaciones, convirtiéndose en especialista en la construcción de diques, presas y canales para contener el mar y ganar nuevas tierras para la agricultura. Al mismo tiempo, ha aprovechado su facilidad de acceso al mar para convertirse en una importante potencia naviera y comercial, con el puerto de Rotterdam ostentando el récord europeo de tráfico. En octubre de 1986, la reina Beatriz inauguró la barrera contra el mar más grande y más avanzada del mundo, que representa la culminación de un plan que ha tardado casi 30 años en llevarse a cabo.

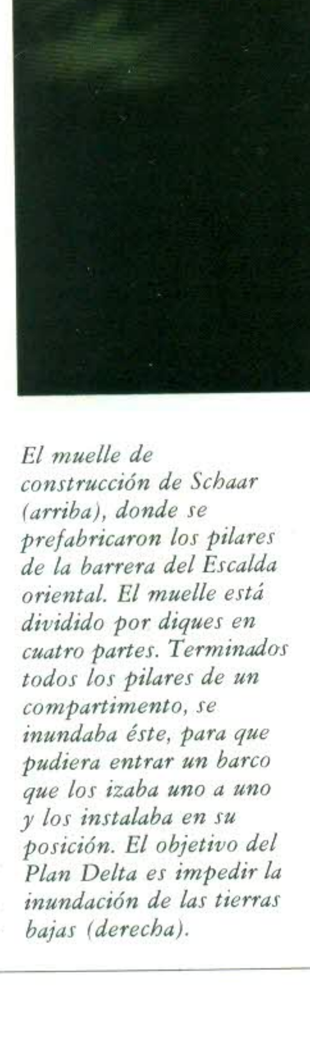
El Plan Delta holandés, a diferencia del cierre del mar de Ijssel, no tenía por objeto arrebatarle nuevas tierras al mar, sino reducir el peligro de inundaciones catastróficas, que en el pasado lograban de vez en cuando rebasar los diques y anegar grandes zonas del país. El último desastre importante se produjo la noche del 31 de enero al 1 de febrero de 1953, cuando la combinación de una marea viva con una fuerte galerna norte-oeste asoló grandes extensiones de tierra. Cientos de diques quedaron destruidos, se inundaron 160.000 hectáreas de tierra, y 1.835 personas perdieron la vida en la peor inundación que han sufrido los Países Bajos.

Ya por entonces se habían empezado a elaborar planes para construir un sistema de presas, pero el desastre hizo que el proyecto se acelerara. En 1958, el Parlamento aprobó la ley Delta, una ambiciosa empresa para remodelar toda la costa suroeste de los Países Bajos, evitando todo peligro de futuras inundaciones y manteniendo abiertas las rutas de acceso a los puertos de Rotterdam y Amberes.

El plan incluía una serie de presas y rompeolas, algunas con esclusas y canales de desagüe, para devolver el agua salada al mar, evitar las inundaciones y mejorar la gestión de las aguas dulces del país. El plan se fue llevando a la práctica paso a paso, empezando por los proyectos más sencillos y progresando poco a poco hasta los más difíciles, aprovechando la experiencia adquirida. Incluía cinco presas primarias, cinco secundarias, el reforzamiento de diques a lo largo del nuevo canal que lleva a Rotterdam y del Escalda occidental, que conduce a Amberes, y la construcción de dos grandes puentes. La primera presa primaria que se construyó, la de Veerse Gat, cerraba un estuario con un volumen mareal de 17,5 millones de metros cúbicos de agua; la última, la del Escalda oriental, tenía un volumen mareal de 2.170 millones de metros cúbicos.

La altura de las presas se fijó aproximadamente un metro por encima del nivel alcanzado por la inundación de 1953. La probabilidad de que se supere este nivel es inferior a 1/10.000 en las zonas de mayor importancia económica —lo que equivale a una probabilidad del 1 por 100 cada cien años— y 1/4.000 en las demás zonas. Entre los principales problemas que hubo que afrontar para construir las presas figuraban la erosión marina, que tiende a socavar los cimientos, y la dificultad de cerrar la última abertura de la presa casi terminada. En la barrera de Haringvliet, por ejemplo, hubo que construir enormes batientes submarinos a cada lado de la presa, consistentes en un colchón de nailon cubierto por sucesivas capas de grava de distintos grados y rocas. La barrera tenía que tener compuertas lo suficientemente fuertes para resistir la fuerza del mar y lo suficientemente anchas para permitir el paso del hielo en invierno.

Para cerrar la última abertura de las presas se emplearon dos métodos diferentes. El primero consistía en construir una serie de cajones prefabricados de hormigón, que se podían instalar cuando el agua estaba tranquila, estrechando poco a poco la abertura hasta que se colocaba el último cajón. Una vez contenida el agua de este modo, se podía construir el resto de la presa alrededor de los artesones. Éste fue el método empleado en la presa de Veerse Gat. La alternativa consistía en construir la presa empezando por las orillas, y después tender un cable transportador entre los dos extremos. Por este cable podían circular va-



El muelle de construcción de Schaar (arriba), donde se prefabricaron los pilares de la barrera del Escalda oriental. El muelle está dividido por diques en cuatro partes. Terminados todos los pilares de un compartimento, se inundaba éste, para que pudiera entrar un barco que los izaba uno a uno y los instalaba en su posición. El objetivo del Plan Delta es impedir la inundación de las tierras bajas (derecha).



gonetas cargadas de piedras, que se hacían llegar hasta el centro y allí descargaban su contenido en el hueco, llenando poco a poco la abertura hasta que por fin las piedras sobresalían del agua. Este método se empleó en la presa de Grevelingen.

La última fase del Plan Delta, y la más complicada, consistía en cerrar el Escalda oriental, una enorme masa de agua mareal, con una barrera de más de 8 kilómetros de longitud. Estaba previsto cerrar el último tramo en 1978, pero los ecologistas iniciaron una fuerte campaña en favor de mantener abierto el Escalda oriental, para preservar el ambiente natural. De haberse cerrado, habría perdido su función como terreno de cría para el pescado del mar del Norte y su atractivo para las aves marinas que acuden en masa a los bancos de arena cuando baja la marea. También

La lucha contra el mar

habría quedado eliminada la cría de marisco. Contra estos argumentos se alzaban las voces de los partidarios de la presa, ansiosos por obtener la mayor protección posible contra las inundaciones y favorecer la agricultura.

Tras años de polémica, el gobierno holandés encargó realizar un estudio que determinara si era posible modificar el proyecto, construyendo en lugar de la presa una barrera que permaneciera abierta en todo momento, excepto en caso de tormenta, cuando se cerrarían las compuertas para evitar inundaciones. El inconveniente era que este nuevo proyecto convertiría en permanente la fase más peligrosa de la operación de cierre, algo que muchos ingenieros consideraban una temeridad. No obstante, el gobierno holandés decidió acceder a las demandas de los ecologistas y convertir la presa en una barrera, a pesar de las dificultades técnicas.

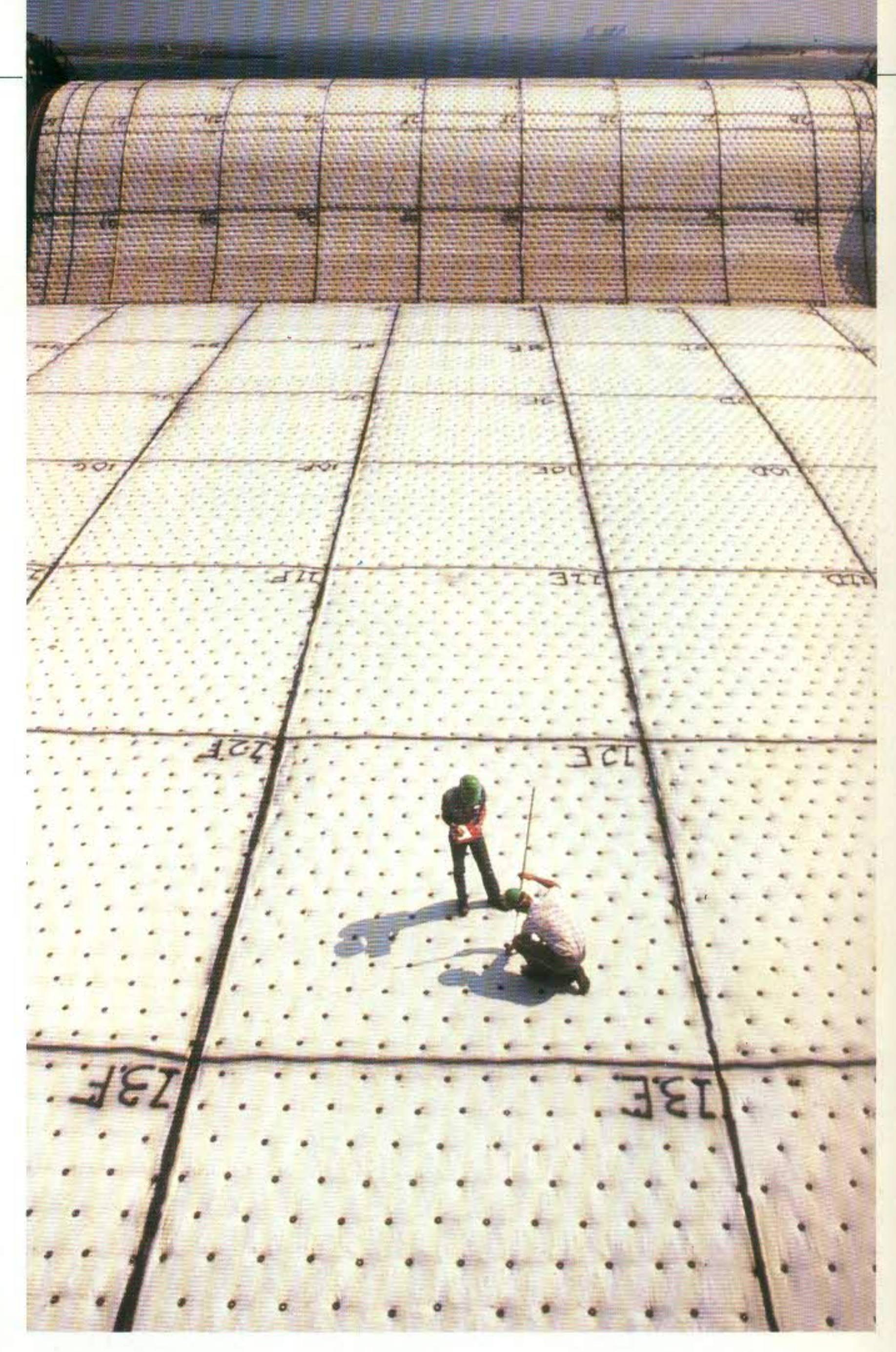
El diseño de la barrera consta de 65 pilastras prefabricadas de hormigón, entre las cuales se han instalado 62 compuertas deslizantes de acero.

Las compuertas tienen más de 5 metros de grosor y 40 de anchura. Con las compuertas levantadas, la diferencia de alturas entre las mareas alta y baja detrás de la barrera sólo quedará reducida a 3/4 de su valor original, permitiendo preservar el medio ambiente natural.

La barrera se ha construido en los tres principales brazos mareales del Escalda oriental, cerrando el resto con una presa. Cuando las compuertas están cerradas, éstas y las pilastras se ven sometidas a fuerzas tremendas. Los cimientos tienen que estar diseñados de manera que estas fuerzas no desplacen las pilastras, lo cual podría atascar las compuertas.

Las pilastras están instaladas en el fondo marino, sobre unos cimientos amortiguadores, cuya función consiste en absorber las variaciones de presión del agua en el subsuelo, de manera que la arena fina situada bajo el «colchón» no sea arrastrada, debilitando los cimientos. Las ligeras variaciones en el nivel de los colchones se compensaron mediante colchones adicionales de hormigón, de espesor variable, instalados antes de insertar los pilares. No tienen anclajes que los fijen al fondo marino, sino que se mantienen en su sitio por su propio peso.

En torno a la base de cada pilastra, se construyó un antepecho de capas de piedras de dimensiones graduales, más grandes cuanto más cerca de la superficie. Las piedras grandes de las capas superiores impiden que las más pequeñas de las capas inferiores sean arrastradas por el agua. La capa superior está formada por rocas de basalto que pesan de 6 a 10 toneladas, para garantizar que, aun cuando una compuerta no se cierre, la corriente que pasa por ella no arrastrará las piedras, poniendo en peligro la barrera.

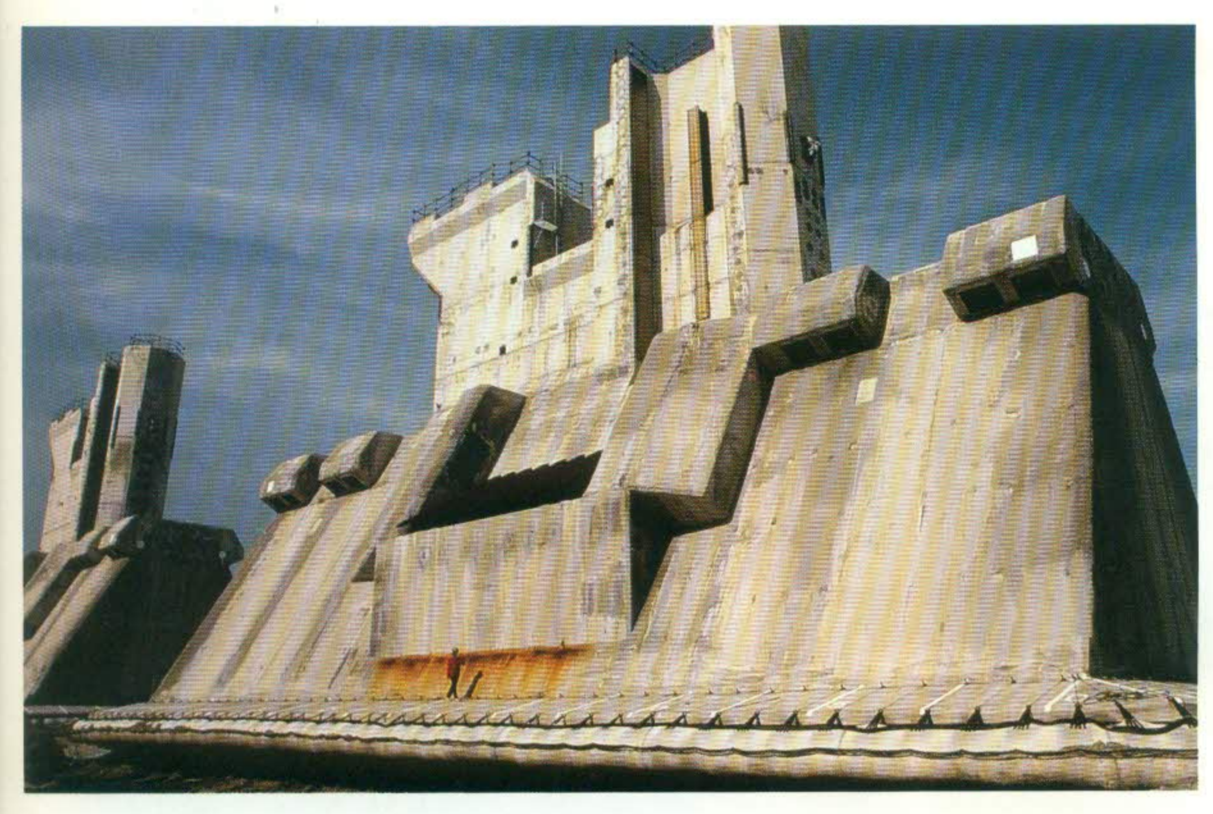


Los «colchones» en los que se apoyan los pilares se fabricaron aparte y constan de capas sucesivas de arena, grava fina y grava gruesa, sobre una base de plástico. Miden unos 200 metros de longitud, 42 de anchura y 30 cm de grosor, y se instalaron con un equipo especial montado en dos barcos. Sobre cada colchón se colocó luego otro más pequeño.

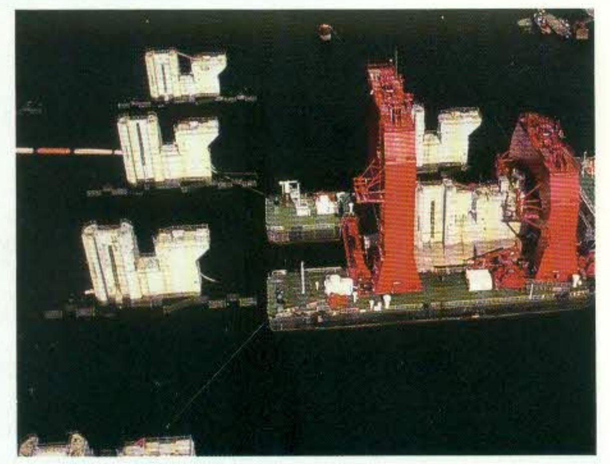
Las pilastras están conectadas por dos series de antepechos de hormigón. Los inferiores pesan cada uno 2.500 toneladas y conectan los pilares bajo el agua. Los superiores, más pequeños, pesan 1.100 toneladas y forman el borde superior de la abertura por la que pasa la marea cuando las compuertas están abiertas.

El funcionamiento de las compuertas se prueba por lo menos una vez al mes, y se tarda aproximadamente una hora en cerrarlas o abrirlas todas. Si se cierran con demasiada rapidez, pueden afectar al movimiento de las olas en el interior de la barrera. Dado que no es frecuente tener que cerrar la barrera para impedir inundaciones, las compuertas se utilizan para regular la cantidad de agua que entra y sale del Escalda oriental.

La barrera quedó por fin terminada en 1986. Se trata de la obra pública más ambiciosa que se ha llevado a cabo en Holanda desde la segunda guerra mundial, y costó 2.400 millones de dólares.



Los 65 pilares prefabricados (izquierda) se construyeron en el muelle de Schaar. Cada uno tiene la altura de un edificio de 12 pisos, pesa 18.000 toneladas y tardó año y medio en construirse. Cada dos semanas se empezaba a trabajar en un nuevo pilar, de manera que luego se pudieran instalar sin interrupciones. En cuatro años se utilizaron 450.000 metros cúbicos de hormigón para hacer los pilares.



La instalación de los pilares de 18.000 toneladas debía realizarse con absoluta precisión. El Ostrea, *un barco en forma de U (derecha), izaba el pilar, lo transportaba a su punto de destino y lo situaba en posición con ayuda de cuatro timones, dos en la proa y dos en la popa. Otro barco mantenía fijo al* Ostrea *mientras éste colocaba el pilar en posición.*



Las compuertas de acero (derecha) miden más de cinco metros de grosor y 40 de anchura. Las dimensiones exactas no se pudieron precisar hasta haber instalado los pilares. La altura de las puertas varía entre 23 y 47 metros, según su posición en el canal. El peso oscila entre las 300 y las 500 toneladas.



La barrera completa contra el oleaje de tormenta. Los tubos que sobresalen por arriba son cilindros hidráulicos. Cada compuerta se abre y se cierra por medio de dos de estos cilindros, accionados desde la cabina central de control.

La conquista de los Alpes





Datos básicos

El túnel de carretera más largo del mundo.

Ingeniero ferroviario: Louis Favre.

Fecha de construcción: Ferrocarril, 1872-1882; carretera, 1970-1980.

Longitud: Ferrocarril, 15 km; carretera, 17 km.

Desde Göschenen, en el cantón suizo de Uri, hasta Airolo, Italia, sólo hay 17 kilómetros, atravesando los Alpes por el túnel de carretera inaugurado en 1980. Pero la creación de una ruta entre estas dos poblaciones ha puesto a prueba la habilidad de los ingenieros durante cientos de años. En la actualidad es posible ir en coche desde Hamburgo, Alemania, hasta la región de Calabria, en la punta inferior de Italia, sin salirse de la autopista. Y todo gracias a este túnel, el túnel de carretera más largo del mundo.

El paso de San Gotardo siempre ha tenido importancia, a causa de su situación en la línea que conecta Milán con el valle del Rin. Según los criterios alpinos, no es demasiado alto —2.080 metros sobre el nivel del mar—, pero jamás ha resultado fácil practicarlo, debido a un peliagudo obstáculo en el lado suizo: la estrecha y escarpada garganta de Schöllenen, por encima de Göschenen. A comienzos del siglo XIII, ingenieros desconocidos lograron franquear esta garganta con un estrecho puente de madera, tendido a unos 30 metros de altura sobre el río Reuss. Para llegar a este puente, construido entre paredes verticales de roca, había que recorrer una pasarela de madera de 75 metros de longitud, sujeta a la roca por medio de cadenas. Dada la tecnología de la época se trataba de un logro importante, y la gente de la región lo llamaba «el puente del Diablo», porque sólo el diablo podía haber tenido el ingenio necesario para construirlo.

En 1595, se sustituyó el puente de madera por un arco de piedra, y en 1707 se construyó el primer túnel alpino, el Urnerloch, que atravesaba la montaña y sustituía a la pasarela. Este túnel, excavado por Petro Morettini, de Ticino, medía 75 metros de longitud, pero su abertura medía tan sólo 3 × 3,60 metros, demasiado estrecha para el paso de carruajes, aunque en 1775 un mineralogista inglés apellidado Greville consiguió hacer pasar por él un calesín, convirtiéndose en la primera persona que atravesaba el paso de San Gotardo montado en un vehículo. En 1830 se ensanchó el túnel para que pudieran recorrerlo carruajes de tamaño normal.

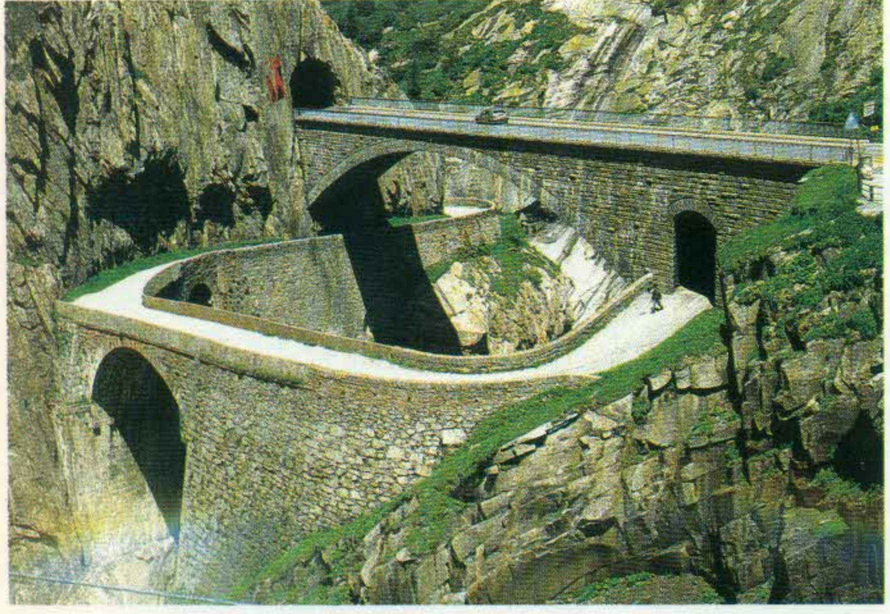
Poco antes, en 1799, el paso había sido escenario de una importante batalla entre una fuerza de 21.000 soldados rusos, mandados por el general Suvarov, y los ejércitos de la Francia revolucionaria. La batalla se libró en el lado italiano del paso de San Gotardo y, tras doce horas de combate, Suvarov derrotó a los franceses; pero éstos, al retirarse, destruyeron el puente del Diablo y dejaron el Urnerloch defendido por una fuerza de retaguardia. Muchos rusos perecieron tratando de desalojar de allí a los franceses, lo cual consiguieron por fin al encontrar un vado por el que cruzar el río. El puente fue reparado, y Suvarov lo cruzó con sus tropas.

Entre 1818 y 1830, las autoridades del cantón de Uri realizaron importantes obras de mejora en la carretera de San Gotardo, en una operación que dejó casi arruinado al cantón. En aquellos tiempos, los pasos no se cerraban en invierno; intrépidos *cantonniers* se encargaban de mantenerlos abiertos, acudiendo después de cada nevada con quitanieves tirados por bueyes, con los que abrían un estrecho pasaje entre la nieve. Los pasajeros abandonaban sus carruajes para montar en trineos de caballos y pasaban, envueltos en pieles y mantas, por el sendero abierto por los bueyes. Se establecieron normas para el tráfico, de manera que, por ejemplo, el caballo que subía tenía preferencia de paso sobre el que bajaba. En lo alto del paso había una hospedería donde los viajeros podían comer y entrar en calor.

En 1850, el ferrocarril podía ya llevar a los viajeros hasta ambos lados de los grandes puertos alpinos, pero todavía se necesitaban carruajes, caballos y trineos para pasar por ellos. En los años posteriores a 1860 se excavó el primer túnel alpino, bajo el monte Cenis; y en 1871, Alemania, Italia y Suiza firmaron un acuerdo para subvencionar la construcción de un túnel a través del macizo de San Gotardo. El encargo recayó en Louis Favre, de Génova, pero la obra acabó con él. Las fuertes penalizaciones por retraso en las obras llevaron a su compañía a la bancarrota, y Favre murió arruinado sin ver terminado el túnel, que se inauguró en mayo de 1882, tras diez años de trabajo.

Uno de los principales problemas era el agua

Los accesos al túnel ferroviario de San Gotardo, en ambas direcciones, necesitaron obras tan impresionantes como el túnel mismo. Por el norte, la línea, con pendientes de hasta un 2,6 por 100 ó 1/37, describe un círculo completo en el túnel de Pfaffensprung, al que siguen otros dos túneles y numerosos viaductos. El acceso por el sur (arriba) resultaba igualmente difícil: hubo que construir dos túneles en espiral sobre este cruce del río Ticino, en la hondonada de Piottino.

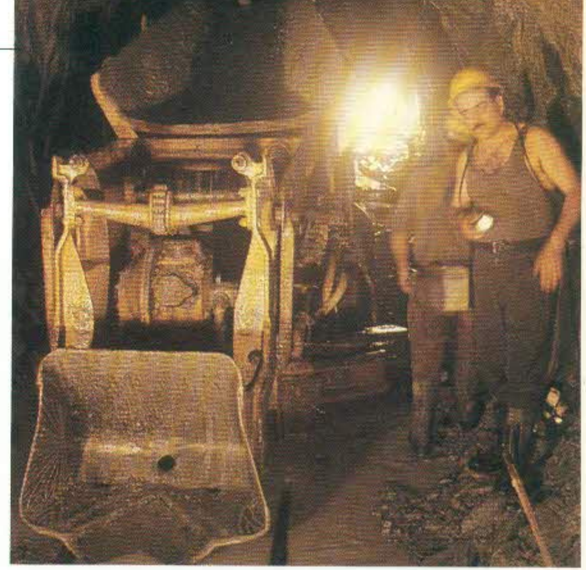


que penetraba en la excavación con la fuerza de una manguera de incendios, obligando a los trabajadores a cavar con agua hasta las rodillas. La dinamita con la que se pretendía volar la roca se diluía, formando una pasta amarillenta, nada más introducirla en los barrenos. Dentro del túnel, la temperatura era tropical y las enfermedades proliferaban. Numerosos hombres y caballos murieron o se vieron obligados a abandonar la obra. Se utilizaban compresores para bombear aire que servía para hacer funcionar los taladros y para respirar; pero los compresores no funcionaban como es debido y muchos mineros se vieron al borde de la asfixia.

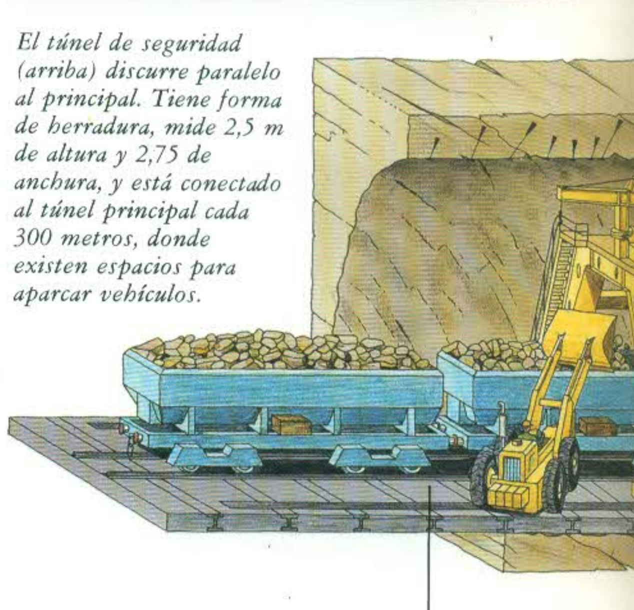
Sin embargo, el peor problema lo planteó el hundimiento del techo en una sección del túnel situada a 2,5 km del extremo suizo. En este sector, el túnel atravesaba rocas inestables, de yeso y feldespato, que en contacto con el aire húmedo empezaron a licuarse, ejerciendo tal presión sobre los pilares del túnel que éstos se rompían. Se tar-

La conquista de los Alpes





El túnel de seguridad (arriba) discurre paralelo al principal. Tiene forma de herradura, mide 2,5 m de altura y 2,75 de anchura, y está conectado al túnel principal cada 300 metros, donde existen espacios para aparcar vehículos.



La excavación, de frente completo, se llevó a cabo con gigantescas perforadoras, de 36,5 toneladas de peso y dotadas de cinco taladros que funcionaban con aire comprimido. También se utilizaron taladros más pequeños (arriba) para abrir agujeros en los que introducir los pernos que sujetaban la red de protección tendida sobre la zona de trabajo, antes de que se instalaran los soportes de acero.

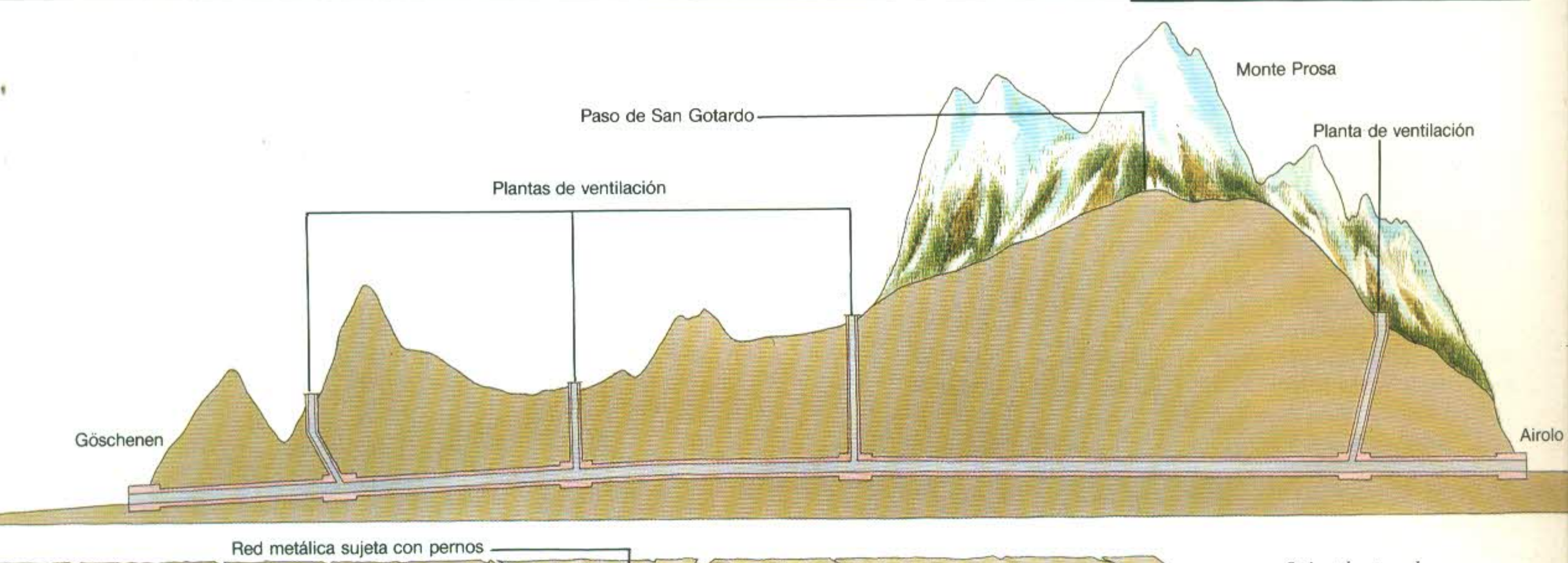
dó dos años en resolver el problema, mediante la construcción de una sólida pared de granito, de más de 2,5 m de espesor, que soportaba un arco de 1,40 m de luz, y que por fin resultó lo bastante resistente como para sostener la masa de barro. Pero el retraso había costado muy caro.

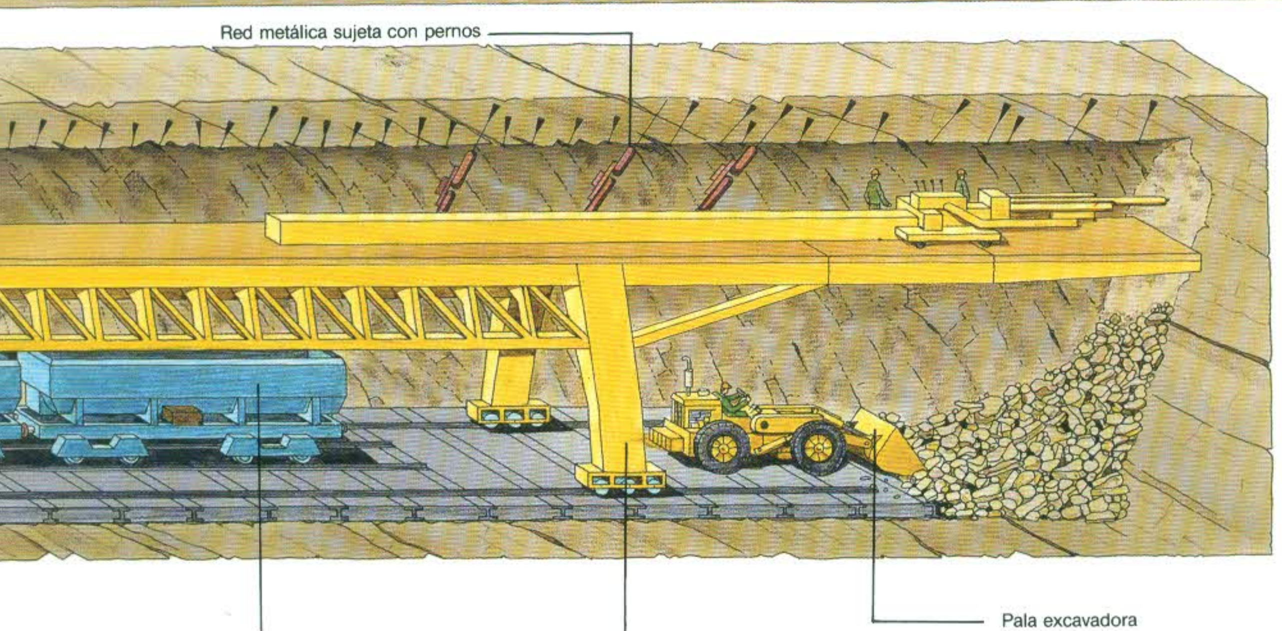
El coste final del túnel ascendió a 57,6 millones de francos, superando en 14,7 millones el presupuesto previsto por Favre. En circunstancias actuales, y dadas las enormes dificultades que hubo que superar, no parecería un gasto excesivo, pero la compañía del ferrocarril insistió en que la empresa de Favre cargara con las pérdidas —los tribunales le dieron la razón— y exigió además una indemnización de 5,7 millones de francos por el retraso sufrido. Favre ya había fallecido, pero esto acabó también con su empresa. No fue la única víctima: el túnel de San Gotardo había costado la vida a 310 trabajadores y dejado incapacitados a otros 877.

En la actualidad existe un segundo túnel a través de la misma montaña, por el que pasa la carretera. También su construcción estuvo llena de dificultades. Las obras comenzaron en 1969, y el túnel se inauguró once años después, en septiembre de 1980. Por exigencia de las organizaciones suizas de automovilistas, se construyó un túnel de seguridad paralelo al principal y separado 30 metros de él, para ofrecer una salida de emergencia en caso de incendio. Los dos túneles siguen una trayectoria curva a través de la montaña, en parte para poder abrir pequeños túneles de ventilación desde el paso y en parte para evitar las rocas más problemáticas. Además, se pensó que conducir a lo largo de una curva suave de 17 kilómetros, con algunos cambios de rasante, resultaría menos fatigoso y peligroso que hacerlo en línea recta.

El túnel comenzó a excavarse por ambos extremos el 5 de mayo de 1970, utilizando un método convencional, consistente en romper la roca con cargas explosivas y retirarla luego por medio de camiones y vagonetas. El túnel de seguridad y los cuatro túneles de ventilación se excavaron al mismo tiempo, aunque el de seguridad iba más avanzado que los demás para investigar las condiciones del terreno. El túnel principal tiene una anchura de 7,60 metros —suficiente para que pase un automóvil en cada dirección— y una altura de 4,5 metros.

La principal innovación introducida en la excavación del túnel consistió en un «suelo deslizante» de acero, de más de 225 metros de longitud. Según avanzaba la excavación, el suelo se corría hacia adelante, proporcionando una superficie só-





Seis plantas de ventilación (arriba), que consumen en conjunto hasta 24 megavatios, extraen los humos tóxicos del túnel. Funcionando a plena potencia, son capaces de cambiar todo el aire del túnel en seis minutos, pero cuando el tráfico es ligero, un ordenador controla los ventiladores para no malgastar energía.

Una plataforma de protección (arriba), de 30 metros de longitud y 5 de altura, con un brazo voladizo de casi 14 metros, permitía trabajar en el arco excavado al mismo tiempo que se extraía la roca volada.

lida para los camiones que llegaban a llevarse la roca, y una plataforma desde la que instalar los pilares que sostienen el techo del túnel. Para asegurarse de que el túnel seguía la dirección correcta, se empleó un sistema de nueve rayos láser, montado en la boca del túnel y apuntando hacia delante, para señalar el perfil de la excavación. A cada 320 metros de avance, se trasladaba el sistema más cerca del frente de obra, situándolo en la dirección que debía seguir la excavación. A unos 800 metros de la boca norte, hay un punto en el que el túnel pasa justo por debajo del túnel del tren, con una separación de tan sólo 4,8 metros de roca, y hubo que poner mucho cuidado en las voladuras para no afectarlo.

En la construcción trabajaron unos 730 obreros, la mitad en cada extremo; el encuentro tuvo lugar en marzo de 1976. A pesar de las estrictas medidas de seguridad adoptadas, 19 personas murieron en accidentes durante la excavación. El túnel está equipado con toda clase de sistemas para garantizar la seguridad de los usuarios. La iluminación es constante, y una de cada diez luces está conectada a una fuente de suministro separada e independiente.

Tanto en el interior del túnel como en los accesos al mismo existen sistemas de señalización que permiten controlar el tráfico, que debe reducirse de los dos carriles que tienen las carreteras que llegan al paso a un solo carril en el túnel. A todo lo largo del túnel, por el lado este, hay salidas que conducen directamente al túnel de seguridad, y en el lado oeste hay nichos con extintores de incendios y teléfonos de emergencia, que sirven de refugio en caso de fuego o accidente. Además, el túnel está equipado con sistemas de alarma de incendios y monitores de televisión. Un sistema especial de radio permite que los automovilistas puedan escuchar la radio dentro del túnel y oír cualquier posible aviso de emergencia.

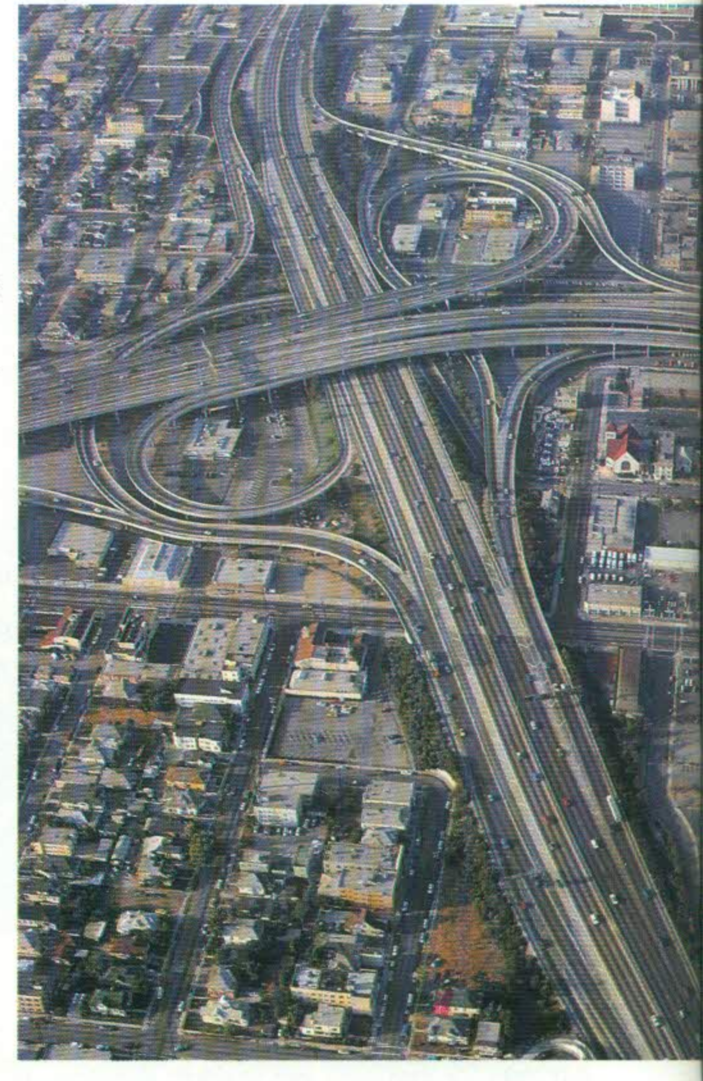
Igual que Favre, los constructores de este túnel se encontraron con rocas difíciles y una cantidad inesperada de agua bajo el macizo de San Gotardo, lo cual retrasó tres años la inauguración. El coste definitivo ascendió a 690 millones de francos suizos, más del doble del presupuesto original.

Las autopistas más grandes del mundo

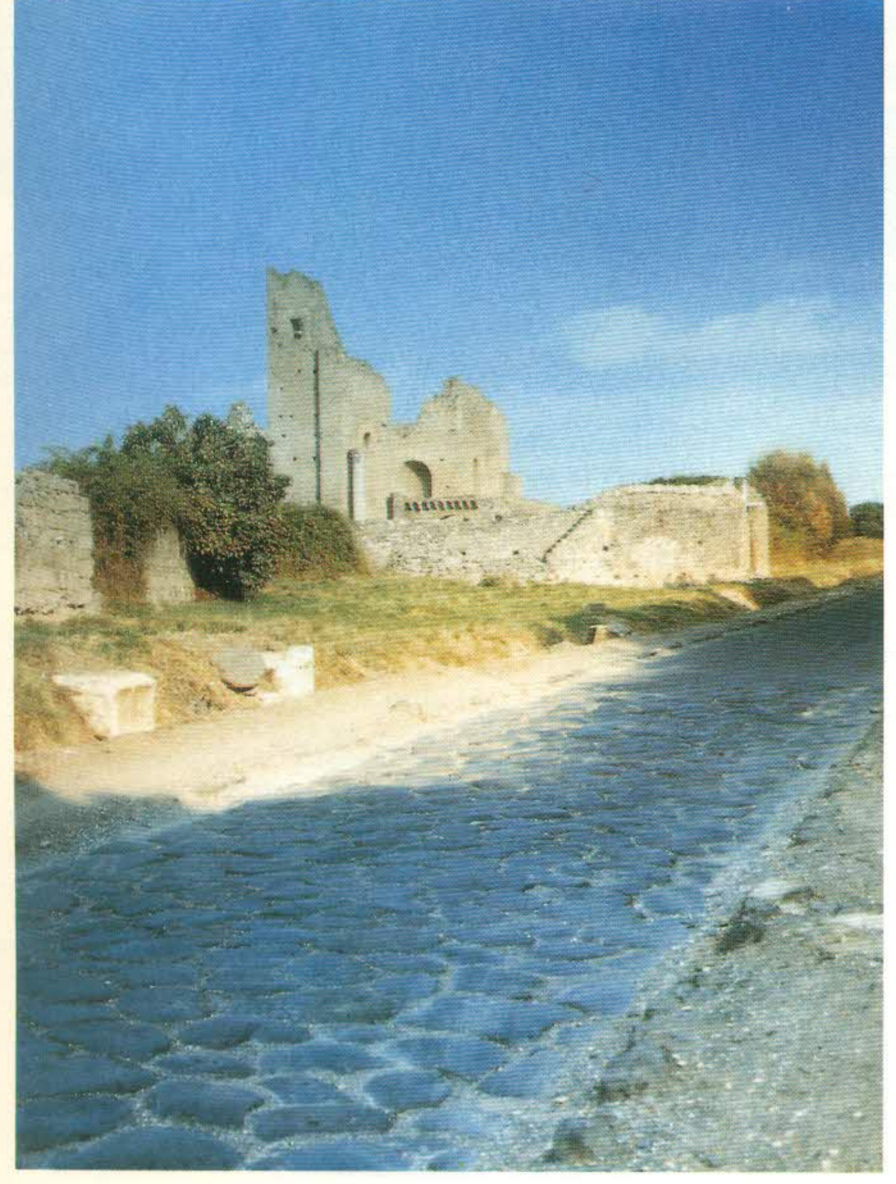
Las primeras carreteras eran poco más que simples caminos, que evolucionaron hasta convertirse en rutas comerciales, las más famosas de las cuales fueron las rutas de la seda, entre Persia y China. Las primeras carreteras pavimentadas fueron obra de los egipcios, que construyeron calzadas de piedra pulida para facilitar el transporte de bloques de piedra para las pirámides. Sin embargo, fueron los romanos los que adquirieron fama por su habilidad en la construcción de carreteras.

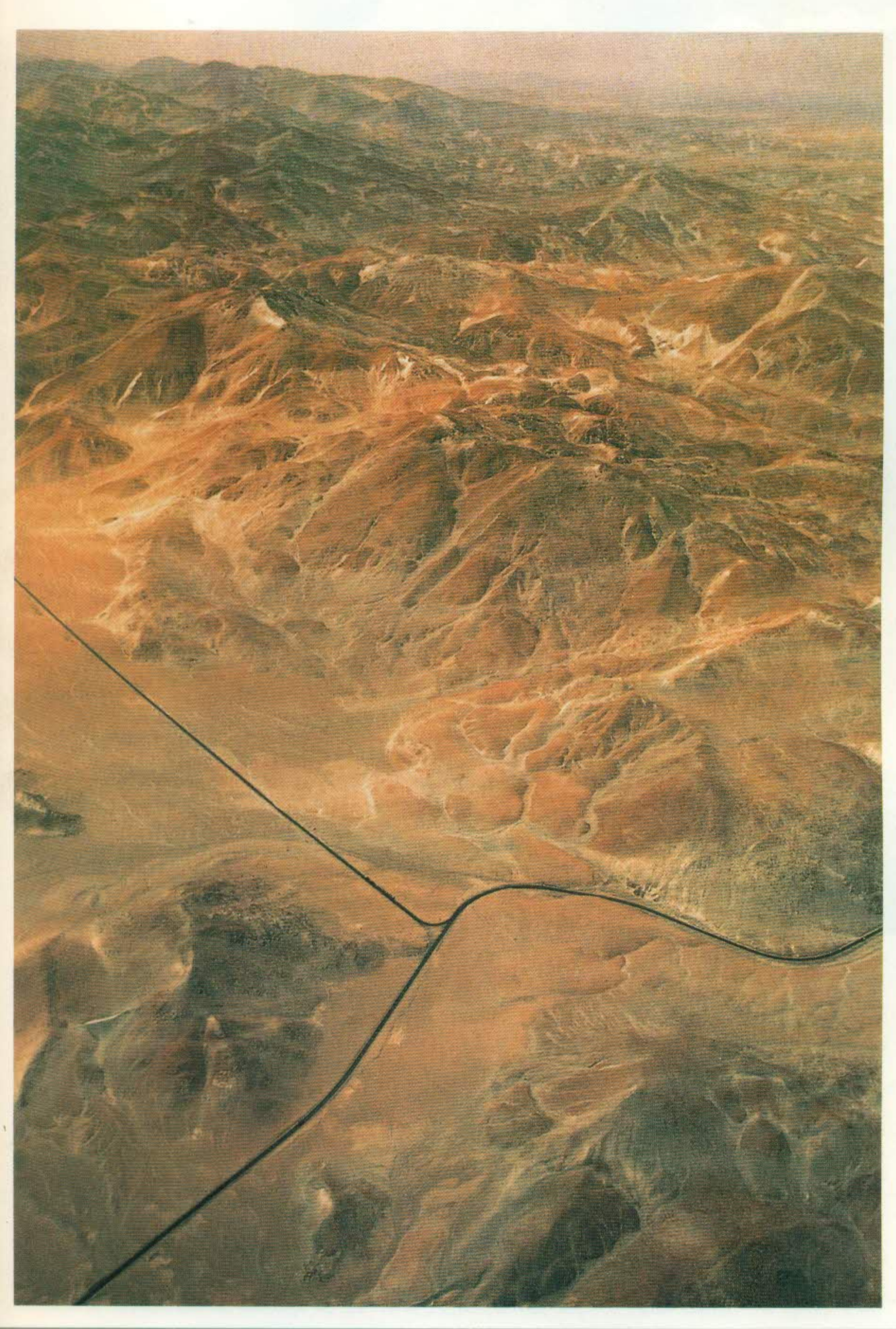
El desarrollo del tráfico rodado exigía mejores carreteras, y así fueron apareciendo las carreteras de peaje británicas, las autopistas de los años treinta y, por último, las autopistas actuales de múltiples carriles. La preocupación que causa su impacto sobre el medio ambiente ha obligado a replantear los planes de carreteras y las previsiones sobre el aumento del tráfico.

La Vía Apia
La calzada que iba desde Porta San Sebastiano, Roma, hasta Capua, construida por orden del censor Apio Claudio y terminada en 312 a.C. (abajo) era la más importante de las carreteras consulares. Más adelante se prolongó hasta Benevento y Brindisi; estaba pavimentada con grandes bloques poligonales de lava basáltica, y su primer tramo estaba flanqueado de tumbas familiares y templos.



El cruce de Los Ángeles
De todas las ciudades del mundo, Los Ángeles es tal vez la más atada al automóvil: cada día, un millón de vehículos transportan a 3,3 millones de pasajeros a lo largo de 1.165 kilómetros de autopistas, casi siempre saturadas, produciendo tal cantidad de vapores tóxicos que sólo con medidas radicales se podrá evitar que la ciudad perezca asfixiada.

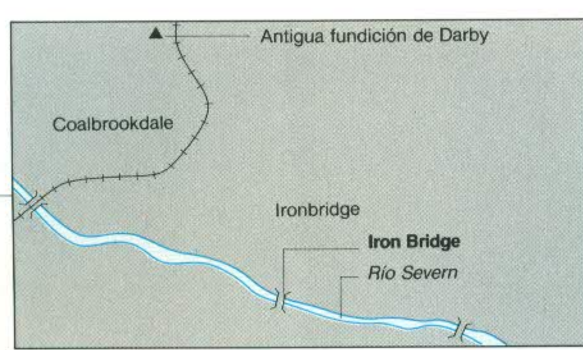




La autopista Panamericana
La carretera más larga del mundo comienza en Texas (varias poblaciones se disputaron este honor) y recorre más de 25.000 kilómetros hasta llegar a Valparaíso, Chile; a partir de aquí, tuerce hacia el este para atravesar los Andes y llegar a Buenos Aires. Presenta varios cortes en América Central y existe una prolongación hasta Brasilia. En la fotografía, la autopista a su paso por los Andes, cerca de Arequipa, Perú.

La maravilla metálica de Darby





Datos básicos

El primer puente de hierro del mundo, construido sobre el río Severn.

Diseñador: Thomas Farnolls Pritchard.

Fecha de construcción: 1777-1779.

Materiales: Hierro fundido y piedra.

Longitud: 30,5 m de ojo.

Peso del hierro: 378 t.

«En las dos millas que van desde Coalport hasta el Iron Bridge, el río recorre el distrito más extraordinario del mundo», escribió Charles Hulbert, ciudadano de Shrewsbury, a finales del siglo XVIII. Según él, esta zona estaba repleta de fundiciones de hierro, fábricas de ladrillos, astilleros, comercios, posadas y casas.

Hulbert estaba describiendo el primer distrito de Inglaterra —y del mundo entero— que sintió el impacto de la Revolución Industrial. Un cambio tan radical y completo que desde entonces ha venido dominando la vida humana. Y el símbolo más elocuente de aquella revolución es el puente que Hulbert menciona, un puente de hierro que cruza el río Severn y que asombró al público desde un principio. El dramaturgo y compositor de canciones Charles Dibdin escribió que «aunque parece un encaje hecho de hierro, tiene aspecto de poder durar siglos intacto». E intacto permanece todavía.

La construcción del puente fue una idea del arquitecto de Shrewsbury Thomas Farnolls Pritchard. Con él se pretendía sustituir un transbordador que atravesaba la garganta del Severn entre Madeley y Broseley, reduciendo los retrasos e incomodidades ocasionados por el deficiente servicio, sobre todo en invierno. No está claro por qué Pritchard se decidió por el hierro fundido, ya que el acta parlamentaria en la que se aprobó la construcción del puente, en la primavera de 1776, permitía elegir entre estructuras de «hierro fundido, piedra, ladrillo o madera». La petición al Parlamento se limitaba a indicar la «utilidad pública» de un puente de hierro, se supone que por razones de duración y resistencia, y con el fin de demostrar las posibilidades del material.

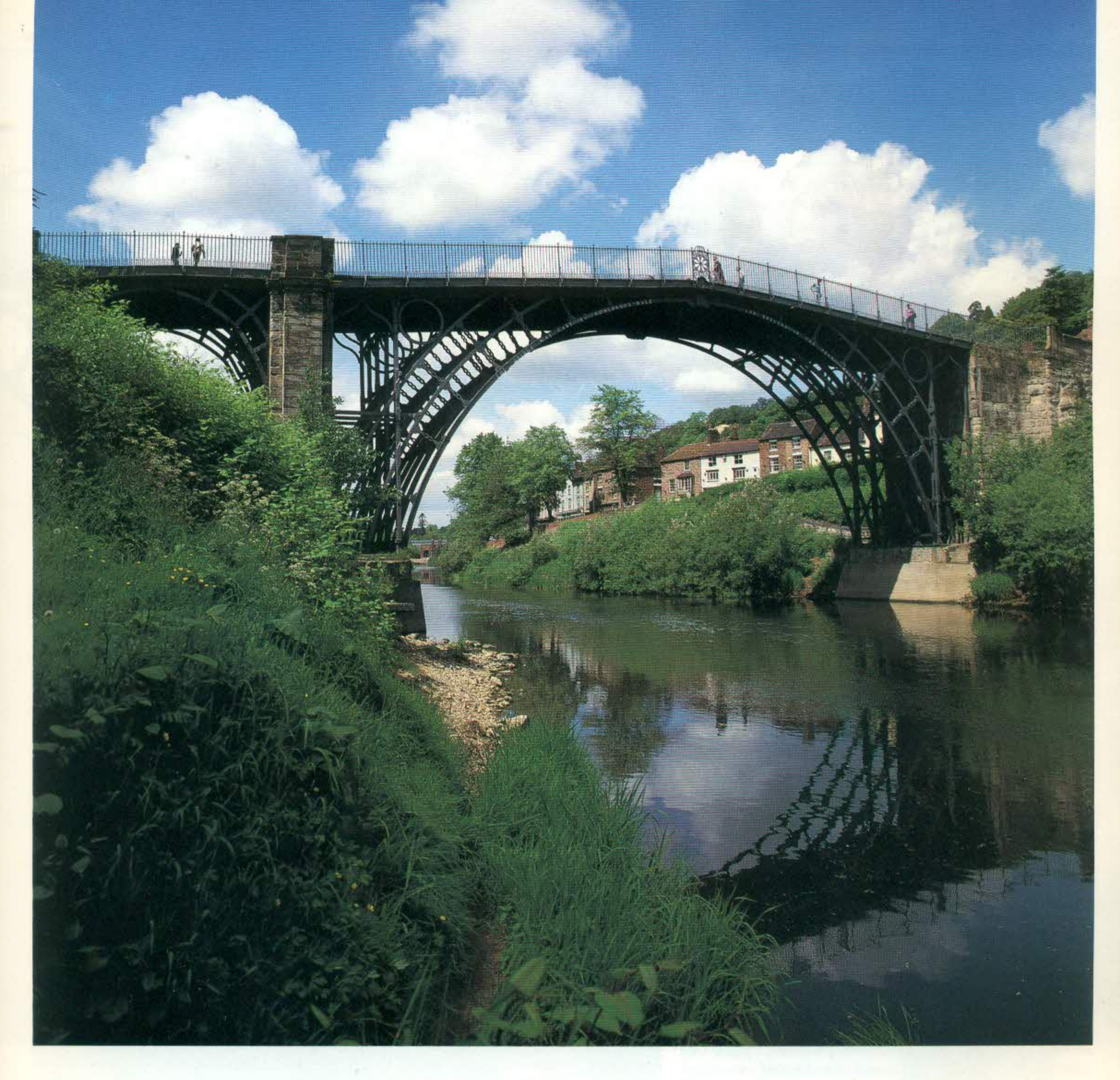
Lo cierto es que, en el verano de 1776, los administradores del proyecto se encontraban divididos en dos bandos: los radicales, encabezados por el fabricante de hierro Abraham Darby III, partidarios de una estructura de hierro, y los conservadores, que preferían una solución más convencional. Aunque se encontraba en minoría, Darby consiguió hacerse con la mayor parte de las acciones y pudo salirse con la suya. Entre Pritchard y Darby calcularon que la construcción del puente costaría unas 3.200 libras esterlinas, de las que 2.100 se invertirían en más de 300 toneladas de hierro fundido, y 500 en piedra preparada. Estas cifras se quedaron luego muy cortas, y la catástrofe financiera no dejó de amenazar durante toda la construcción del puente.

Darby, a quien Pritchard había elegido para que construyera el puente, era el tercer miembro de su familia con el mismo nombre. Su abuelo, Abraham Darby I, ideó en 1709 un método para fabricar hierro en un alto utilizando carbón de coque en lugar de hulla como fuente de carbono. Aunque se trataba de un descubrimiento que a la larga iba a tener una enorme importancia, los demás fabricantes tardaron mucho en adoptarlo, porque en aquellos tiempos no había escasez de hulla y el coque sólo daba buenos resultados si se elegían con mucho cuidado el mineral y el carbón. Pero en 1755, su hijo, Abraham Darby II, que también trabajaba en Coalbrookdale, había construido un alto horno de coque tan eficiente como los de hulla, que producía hierro de primera calidad. Sería su hijo, el tercero de la dinastía, quien aplicaría este material a la construcción del puente.

Los primeros diseños de Pritchard presentaban un puente de un solo ojo, de 36 metros de longitud, con cuatro conjuntos de arcos curvos, de 22 × 15 cm de sección. Pero en julio de 1777 la extensión se había reducido a 27 metros, y el diseño había cambiado. Posteriormente, se volvió a agrandar a 30,5 metros, para dejar paso a un remolcador que recorría las orillas del Severn, y éste fue el diseño que por fin se llevó a la práctica. El 21 de diciembre de 1777, cuando apenas se habían iniciado las obras, Pritchard falleció, dejando el proyecto en manos de Darby.

Las piezas más grandes del puente son los arcos principales, cada una de las cuales pesa 5,75 toneladas. En aquella época, los altos hornos de Coalbrookdale producían poco más de dos toneladas de hierro en cada operación, de manera que no es posible que se hicieran vertiendo el hierro fundido en moldes directamente desde el horno. Lo más probable es que se construyera un horno especial de refundición a orillas del río Severn, para fundir de nuevo el hierro previamente fabricado en el alto horno y verterlo en moldes de arena.

Este sistema habría presentado la ventaja de no tener que transportar las pesadas y frágiles piezas de hierro desde la fundición de Coalbrookdale hasta la orilla del río, situada a casi dos kilómetros de distancia. Aunque muy resistente a la compresión, el hierro fundido es un material quebradizo, que exige un manejo cuidadoso hasta que queda bien instalado. Una vez montados los arcos, y gracias al diseño del puente, las fuerzas ejercidas sobre ellos eran predominantemente de compresión.



Considerando el interés que despertó la estructura en sus tiempos, parece extraño que dispongamos de tan poca información acerca de su construcción. Parece que casi todo el montaje de los arcos se llevó a cabo en seis semanas durante el verano de 1779. El primer par quedó instalado entre el 1 y el 2 de julio. En la obra trabajaban de 25 a 30 operarios. En los libros de cuentas de Darby ha quedado registrada la compra de grandes cantidades de madera para construir un andamiaje, desde el cual se suspendían los arcos con cuerdas, haciéndolos descender hasta que se juntaran en el centro.

A mediados de agosto, los libros registran un gasto de 6 libras en cerveza, se supone que para celebrar la finalización del montaje de los arcos; y a finales de noviembre, los mismos libros dan constancia de la retirada del andamiaje, por lo que podemos suponer que para entonces el puente estaba ya terminado.

Tampoco se sabe a ciencia cierta cuánto costó el puente, pero según fuentes contemporáneas, la cifra no debió bajar de 5.250 libras. Parece ser que Darby aportó de su propio bolsillo las 2.000 libras de más, lo cual estuvo a punto de arruinarle. Durante el resto de su vida tuvo hipotecadas sus propiedades, y no cabe duda de que pagó un alto precio por la inmortalidad.

El diseño del puente, bastante conservador, ofrecía un generoso margen de seguridad, ya que aún no se conocían muy bien los límites de resistencia del hierro. Pero Darby —o quizá Prit-

La importancia del Iron Bridge y la zona que lo rodea en la historia del desarrollo industrial ha quedado reconocida por la UNESCO, que ha declarado el lugar parte del Patrimonio Mundial.

La maravilla metálica de Darby

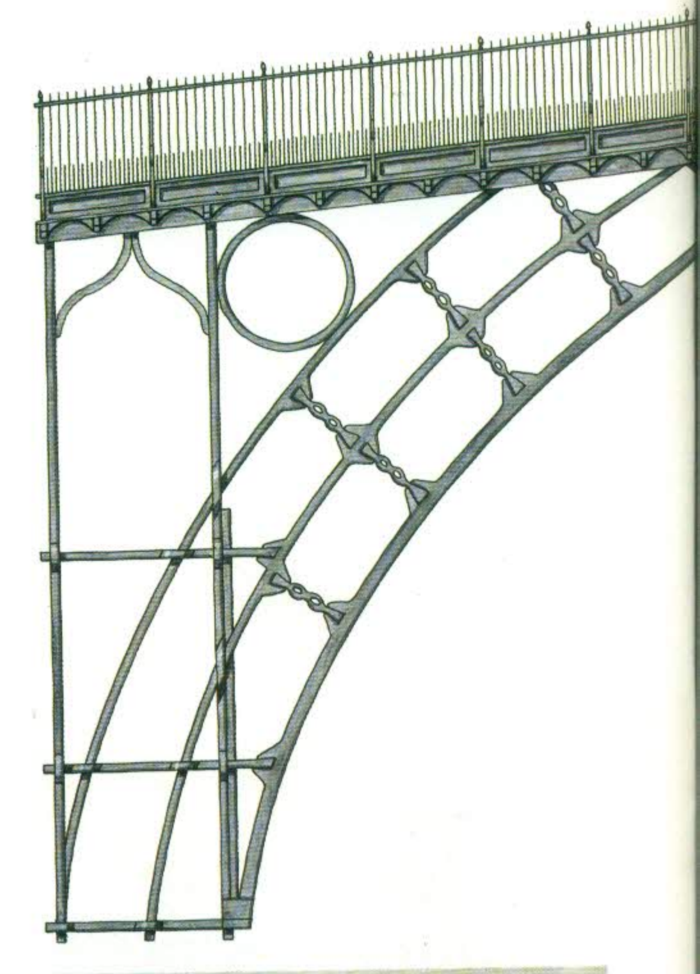
chard— cometió un pequeño error, al no tener en cuenta que un puente de hierro es mucho más ligero que uno de piedra. En un puente de piedra, el peso es tan grande que el arco ejerce una gran fuerza hacia afuera, lo cual obliga a levantar terraplenes para resistir el desplazamiento. En cambio, en un puente de hierro la presión hacia afuera es menor, y los terraplenes se fueron corriendo poco a poco hacia adentro, levantando la parte central del arco.

A principios del siglo XIX se añadieron al puente dos arcos laterales, pero siguieron produciéndose corrimientos de tierras y empezaron a aparecer grietas. A comienzos del XX, se añadieron varios tirantes y barras para reforzar la estructura, que se cerró al tráfico de vehículos en 1934. A finales de los años sesenta, el continuo desplazamiento de los contrafuertes había provocado cierta inquietud respecto al futuro del puente.

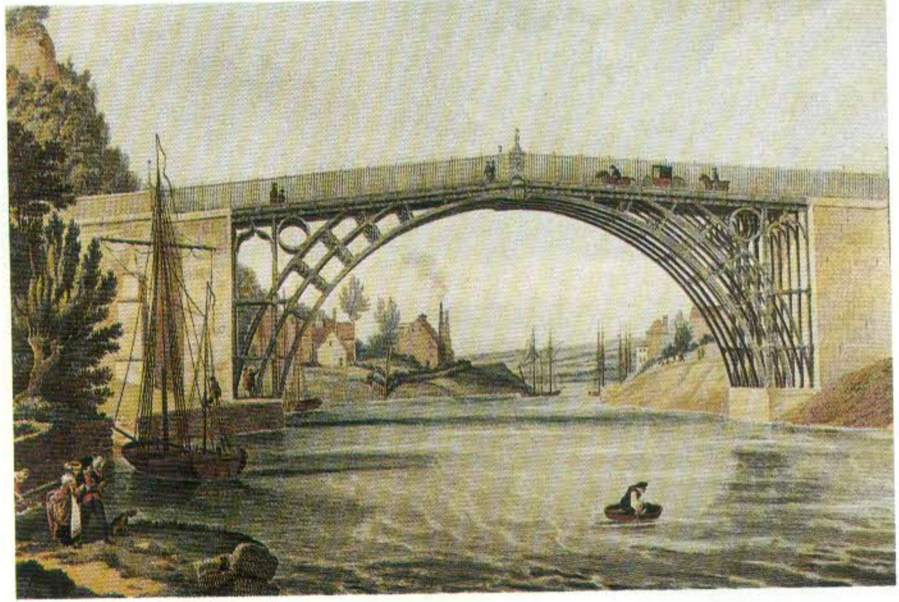
Los expertos consultados aconsejaron reforzar los cimientos del contrafuerte del norte para evitar nuevos desplazamientos, e insertar una tornapunta bajo el agua, para mantener los contrafuertes separados a una distancia fija. La tornapunta adoptó la forma de una plancha de hormigón armado, insertada en una zanja en el fondo del río, con paredes a cada lado, que llegaban hasta las paredes interiores del contrafuerte. A pesar de las crecidas y otras muchas dificultades, la obra se terminó durante la bajada de las aguas en los veranos de 1973 y 1974, gracias a lo cual el puente podrá sobrevivir otros 200 años.

El éxito de la construcción del puente, que terminó en 1779, inició un período de construcción de puentes de hierro fundido y forjado, que se prolongó durante un siglo. Poco después de 1790 se había construido sobre el río Wear, en Sunderland, un gigantesco puente de arco único, que medía 72 metros pero contenía menos hierro que el de Coalbrookdale. En 1795, las crecidas del Severn destruyeron muchos puentes, pero el puente de hierro se mantuvo firme, lo cual aumentó su fama y constituyó una excelente publicidad de las ventajas del hierro fundido.

En gran medida, el Iron Bridge ha logrado sobrevivir porque Coalbrookdale, después de abrir la marcha de la Revolución Industrial, quedó prácticamente inactivo. Los centros industriales se trasladaron a Manchester, Glasgow, Newcastle y otras grandes ciudades. Si el tráfico por el río Severn hubiera continuado aumentando durante el siglo XIX, no cabe duda de que se habría sustituido el puente de hierro por otro mayor y más moderno; pero no sucedió así. En consecuencia, ha quedado como único superviviente de un tiempo pasado, convertido en la pieza central del próspero museo que son ahora los lugares históricos de Coalbrookdale.



«Un puente de construcción muy curiosa»: así describieron los inversores el diseño de Pritchard, basado en los principios de la carpintería, con ensambladuras de cola de milano y de caja y espiga. No se emplearon tornillos ni remaches.



Coalbrookdale y el Iron Bridge fueron las primeras zonas industriales que se convirtieron en atracción turística, visitada por numerosos viajeros eminentes y celebrada en pinturas, monedas, jarras de cerveza, vasos e incluso parrillas de chimenea. Además de las fundiciones de Darby, las orillas del río y sus alrededores estaban plagados de talleres de fabricación de ladrillos, azulejos y porcelana, almacenes y muelles de carga. El puente resultaba utilísimo para el comercio de la zona.

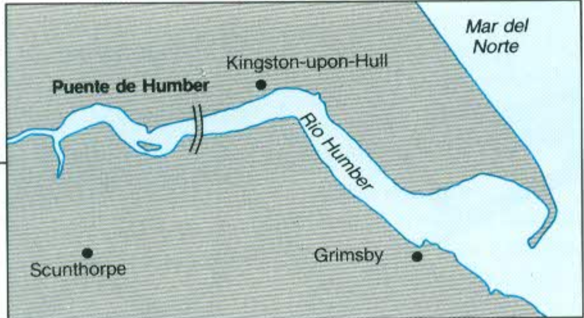


Los cinco conjuntos de arcos semicirculares se apoyan en estribos de albañilería. Otros dos conjuntos de arcos sostienen la calzada entre el ojo y las orillas. Las uniones se aseguraron con cuñas. Los pernos que hoy se pueden ver se añadieron posteriormente.

Las embecaduras están decoradas y reforzadas con aros, y las dos vigas verticales junto a los estribos presentan golas decorativas. El diseño exigía fundir piezas de gran precisión.

El puente más largo





Datos básicos

El puente colgante de ojo más largo del mundo.

Diseñador: Freeman Fox.

Fecha de construcción: 1972-1981.

Material: Hormigón armado y acero.

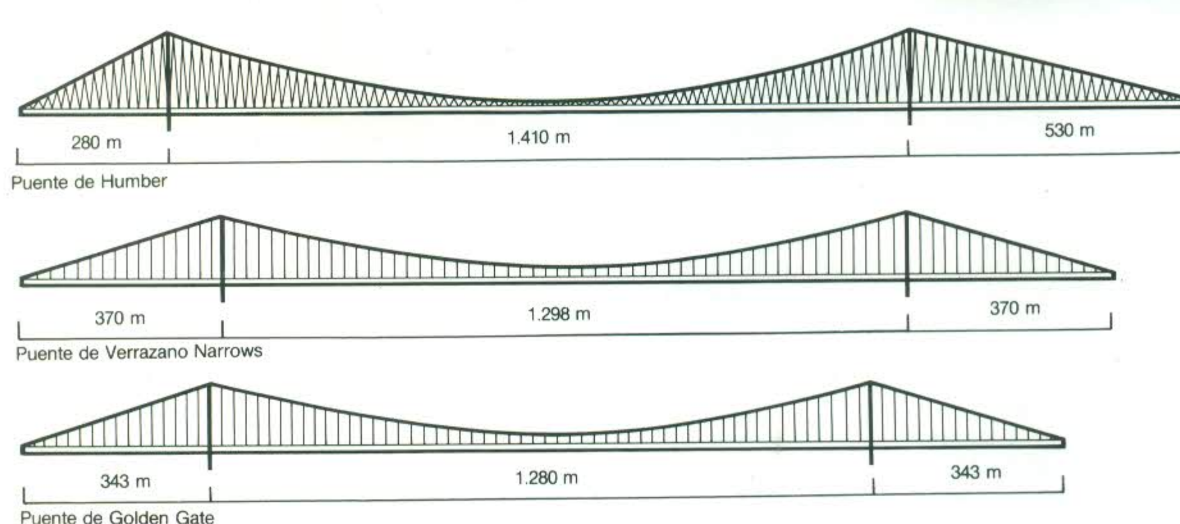
Longitud: 1.410 m.



El puente colgante de luz más larga del mundo se encuentra en el estuario del Humber, y conecta las dos mitades del condado inglés de Humberside. Además de ser el más largo, con 1.410 metros de luz, ostenta el récord mundial de rapidez en la acumulación de deudas. Desde el día de su inauguración, en 1981, el peaje que pagan los automóviles que lo cruzan nunca ha llegado a igualar los intereses de los préstamos que hubo que solicitar para construirlo, de manera que el déficit no deja de aumentar. Sus detractores lo llaman «el puente que va de ninguna parte a ninguna parte», y el volumen de tráfico que lo recorre jamás se ha aproximado a las estimaciones realizadas antes de la construcción. No obstante, se trata de una magnífica estructura, de aspecto atractivo y tecnológicamente brillante.

El diseño lo realizó la firma inglesa de ingeniería Freeman Fox & Partners. La plataforma principal está sostenida por dos gigantescos cables de acero, firmemente anclados a cada lado del estuario, y suspendidos de lo alto de dos torres de hormigón, de manera que cuelgan por encima del río describiendo una elegante curva catenaria. Los cables están conectados, por medio de otros cables de acero, de alta resistencia a la tracción, a una serie de cajas poco profundas que forman la calzada del puente. Este tipo de construcción da buenos resultados, y se utiliza en puentes que deben tener una luz muy amplia, como el de Verrazano Narrows en Nueva York, el puente del Bósforo en Estambul, y el puente sobre el Severn que conecta Inglaterra y Gales (los dos últimos también son obra de Freeman Fox).

La primera fase de la obra consistió en construir los anclajes y las torres. En Hessle, en la orilla norte, se podían construir ambas cosas sobre una sólida base de roca caliza que se encuentra muy cerca de la superficie. La orilla sur presentaba más dificultades, ya que no existía allí roca caliza, y la única base suficientemente sólida era una capa de arcilla de Kimmeridge situada a 30 metros bajo la superficie. Así pues, hubo que construir la torre sur, unos 460 metros río adentro, con los anclajes al borde del agua. Para que la torre tuviera unos cimientos sólidos, se utilizaron cajones de hormigón, grandes estructuras circulares y abiertas, diseñadas para hundirse poco a poco por su propio peso según se van construyendo, hasta que el borde inferior queda hundido unos 8 metros en la arcilla. Los cajones se fueron hundiendo mientras una excavadora iba extrayendo material de su interior, pero entonces se toparon con una corriente subterránea de agua, que arrastró rápidamente la bentonita, una sustancia mineral que se utiliza para lubricar la superficie del hormigón y facilitar su penetración en la tierra. Esto ocasionó tremendas dificultades



El puente de Humber se diferencia de sus competidores más próximos en varios aspectos: la topografía y la geografía impidieron utilizar un diseño simétrico para los brazos laterales, aunque la longitud del puente disimula la asimetría. Y hasta entonces, el empleo de hormigón armado para las torres, en lugar de acero, era algo reservado para puentes con ojos mucho más cortos.



e importantes retrasos. Hubo que aumentar la altura de los cajones y amontonar encima unas 6.000 toneladas de piezas de acero para ejercer el peso necesario para que los cajones se hundieran hasta su posición definitiva.

Las torres se construyeron con hormigón armado, vertido en moldes instalados sobre una plataforma que podía irse elevando por medio de gatos según se iban levantando las torres. Cada torre mide 145 metros de altura y se levantaron a un ritmo de dos metros diarios. La torre Barton, en el extremo sur del puente, se construyó en sólo diez semanas.

A continuación, se tendió una pasarela a través del estuario, utilizando seis cables transportados en barcos y después tensados. Esta pasarela provisional permitiría a los trabajadores instalar los cables principales de suspensión, con un peso total de 11.000 toneladas. Durante el torcido de los cables, los cables individuales se transportaban enrollados en un torno, a bordo de un funicular. A lo largo de la pasarela había hombres cada 100 metros para manejar el cable según se iba desenrollando. Poco a poco, los cables fueron adquiriendo su grosor definitivo, de 68 cm. A intervalos fijos, se instalaban en los cables bandas de acero para conectar los colgadores que sostendrían la plataforma. A continuación, se revistieron los cables con pasta de minio y se les añadió un entorchado de cable de 3,5 mm, utilizando máquinas entorchadoras especiales. Por último, se les aplicaron cinco capas de pintura para pro-

La longitud de la luz del puente obligó a los ingenieros a tener en cuenta la curvatura de la Tierra. Las torres están construidas con una desviación de 36 mm respecto a la paralela. Se realizaron numerosas pruebas previas con maquetas en túneles de viento, y el conjunto puede soportar una desviación y desplazamiento de unos 2,5 metros entre un extremo y otro de los ojos.

El puente más largo



Los anclajes de los cables están formados por secciones de hormigón armado revestidas por paneles reforzados con fibra de vidrio, que les dan un acabado estriado muy decorativo.

tegerlos contra las inclemencias climáticas.

Una vez montada la plataforma del puente, la última fase consistía en aplicar a las cajas el pavimento definitivo, una capa de 38 mm de asfalto plástico, lo bastante denso como para impedir que el agua penetre hasta el acero de abajo, y lo bastante flexible como para resistir cierta deformación sin agrietarse. Se necesitaron 3.500 toneladas de asfalto para pavimentar todo el puente.

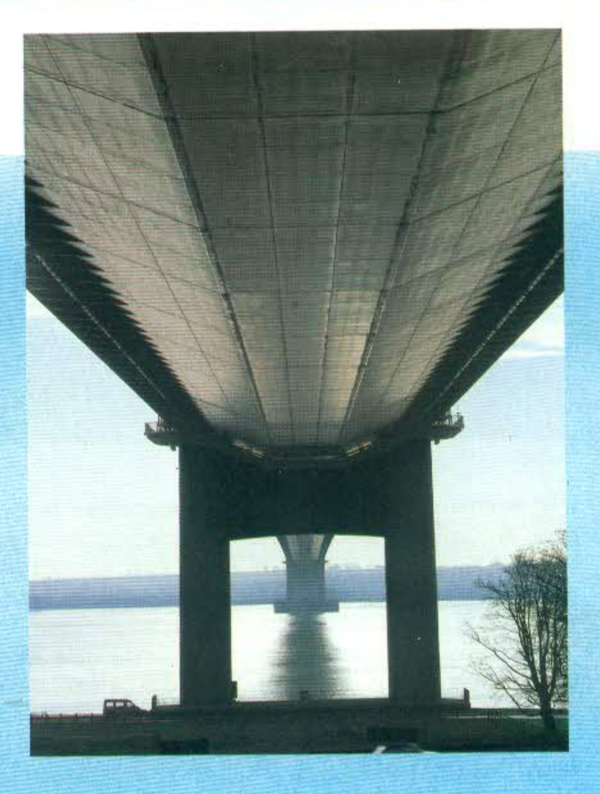
Tanto en el aspecto estético como en el técnico, no cabe duda de que el puente es un éxito. Aunque en los planos no se hicieron concesiones para añadirle belleza, su austera sencillez matemática nunca deja de impresionar.

Sin embargo, el estado de cuentas del organismo responsable de su gestión, Humber Bridge Board, es mucho menos halagüeño, con abrumador predominio de los números rojos. Debido en parte a los retrasos en la cimentación de la torre Barton, el puente tardó mucho en inaugurarse. Las obras comenzaron en abril de 1973, y el puente no se abrió al tráfico hasta el verano de 1981. Además, los costes se dispararon, a causa de la inflación. En lugar de los 28 millones de libras presupuestados en 1972, la construcción acabó costando 90 millones. Todo esto, más los intereses acumulados durante la construcción, dejó al puente con una deuda de 151 millones de libras el día de su inauguración. Desde entonces, los intereses han sido siempre superiores a los ingresos obtenidos con el peaje, y la deuda no ha parado de aumentar. En 1987 ascendía ya a 300 millones de libras, y en 1989 alcanzaba los 350 millones. La Asociación de Transporte de Mercancías ha calculado que, si no se hace nada al respecto, para 1993 la deuda ascenderá a 576 millones; en 2023 habrá superado los 21.500 millones, y para el año 2043 alcanzará la astronómica cifra de 248.247 millones de libras esterlinas. Aunque el peaje aporta unos beneficios aproximados de 9 millones de libras al año, esto no resulta suficiente, y aumentar las tarifas no serviría de nada, ya que disminuiría el número de usuarios. El peaje que paga un automóvil, 1,60 libras, es ya el más elevado de Gran Bretaña. Sin embargo, aún existen esperanzas de que el gobierno británico, que prestó el dinero para construir el puente, acceda a cancelar una parte de la deuda, dándole al puente una oportunidad de cubrir gastos.

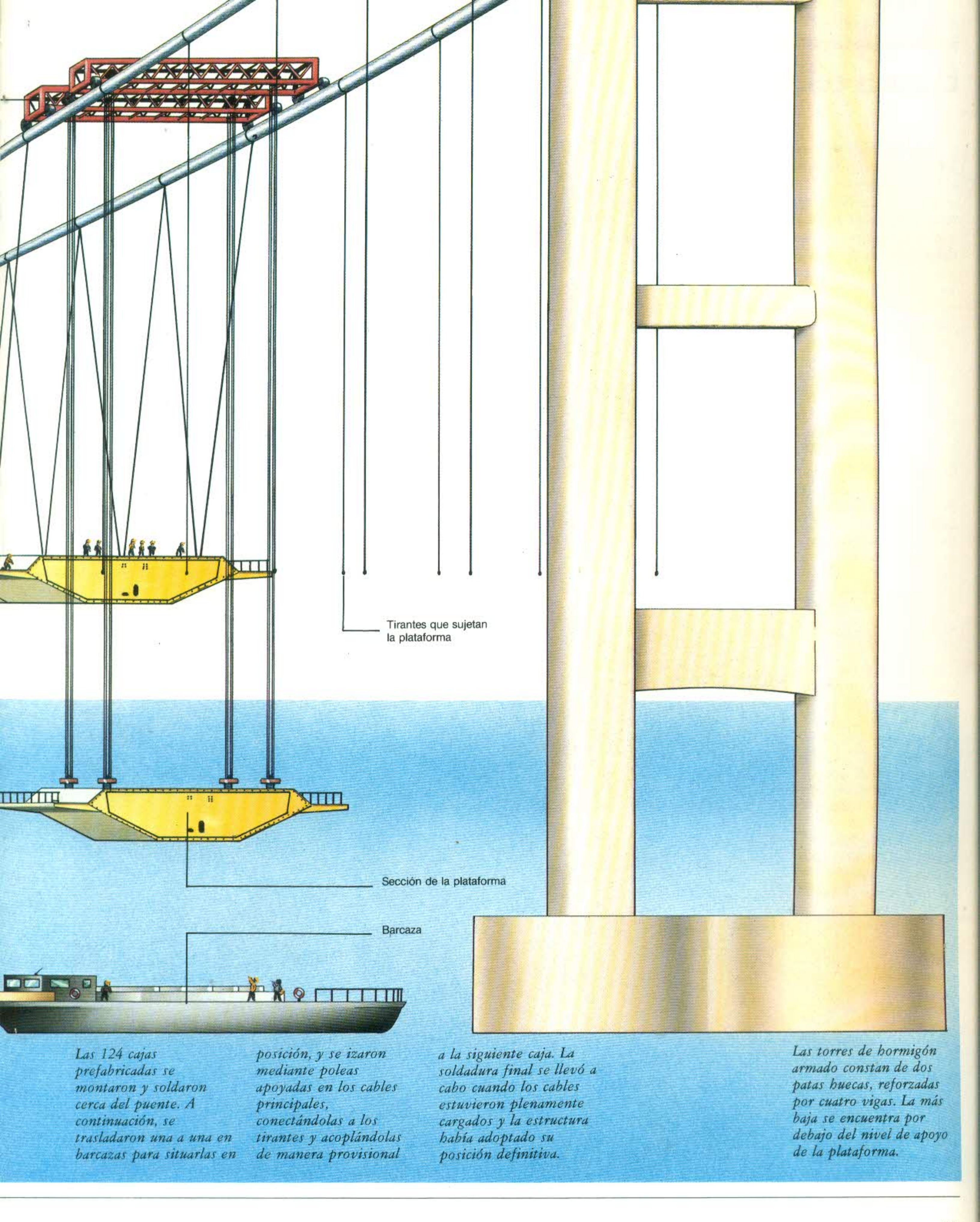
Trole con poleas para izar las secciones

Cable principal

Cada cable principal está formado por 14.948 cables paralelos, de 5 mm de diámetro cada uno, con una longitud total de 66.000 kilómetros. Para simplificar la instalación, los cables van agrupados en 37 haces de 404 unidades cada uno.



Las cajas trapezoidales huecas que forman la plataforma del puente son uno de sus rasgos distintivos. Las cajas de acero son más ligeras que las estructuras macizas habituales, lo cual permite economizar en los cables, torres, anclajes y cimientos; además, la forma «aerodinámica» reduce el impacto del viento sobre el puente y facilita su mantenimiento.



Las 124 cajas prefabricadas se montaron y soldaron cerca del puente. A continuación, se trasladaron una a una en barcazas para situarlas en posición, y se izaron mediante poleas apoyadas en los cables principales, conectándolas a los tirantes y acoplándolas de manera provisional a la siguiente caja. La soldadura final se llevó a cabo cuando los cables estuvieron plenamente cargados y la estructura había adoptado su posición definitiva.

Las torres de hormigón armado constan de dos patas huecas, reforzadas por cuatro vigas. La más baja se encuentra por debajo del nivel de apoyo de la plataforma.

Puentes célebres

Se han venido construyendo puentes desde que los pueblos primitivos tendieron el primer tronco a través de un arroyo, creando así el primer puente de viga. La diferencia fundamental entre los tres principales tipos de puente —de viga, de arco y colgante— radica en la manera en que se desplazan las fuerzas ejercidas por el peso del puente. En el caso de un puente de viga o voladizo (este último consiste en una serie de vigas equilibradas sobre pilares), el peso se apoya directamente en el suelo. Un puente de arco ejerce un empuje hacia fuera en los estribos, y un puente colgante mantiene tensos los cables desde los puntos de anclaje situados a cada extremo.

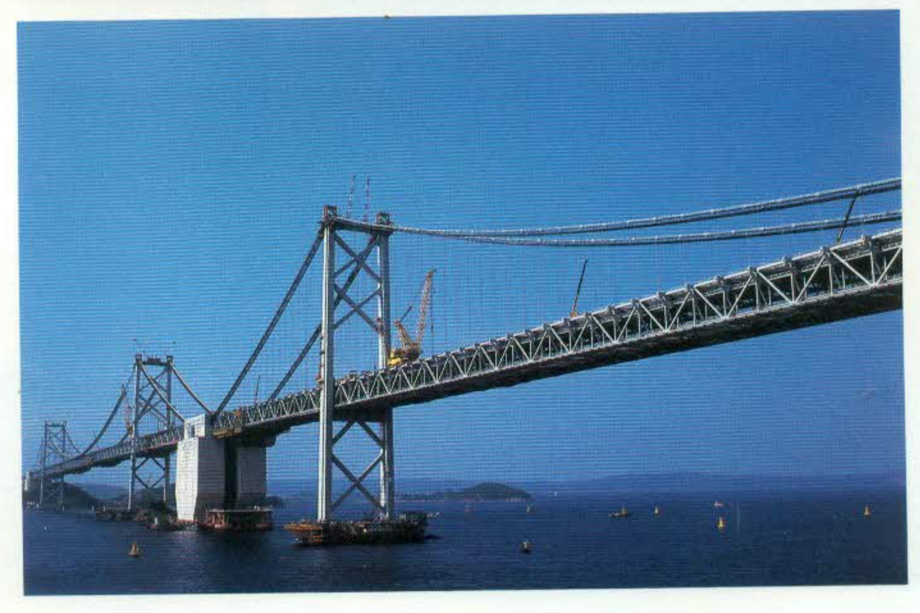
En ocasiones, se combinan varios principios, pero todos los puentes se basan en permutaciones de estos tipos básicos. Los primeros puentes se hicieron de madera. Más adelante, se construyeron puentes de piedra, ladrillo, hierro, acero, etc.



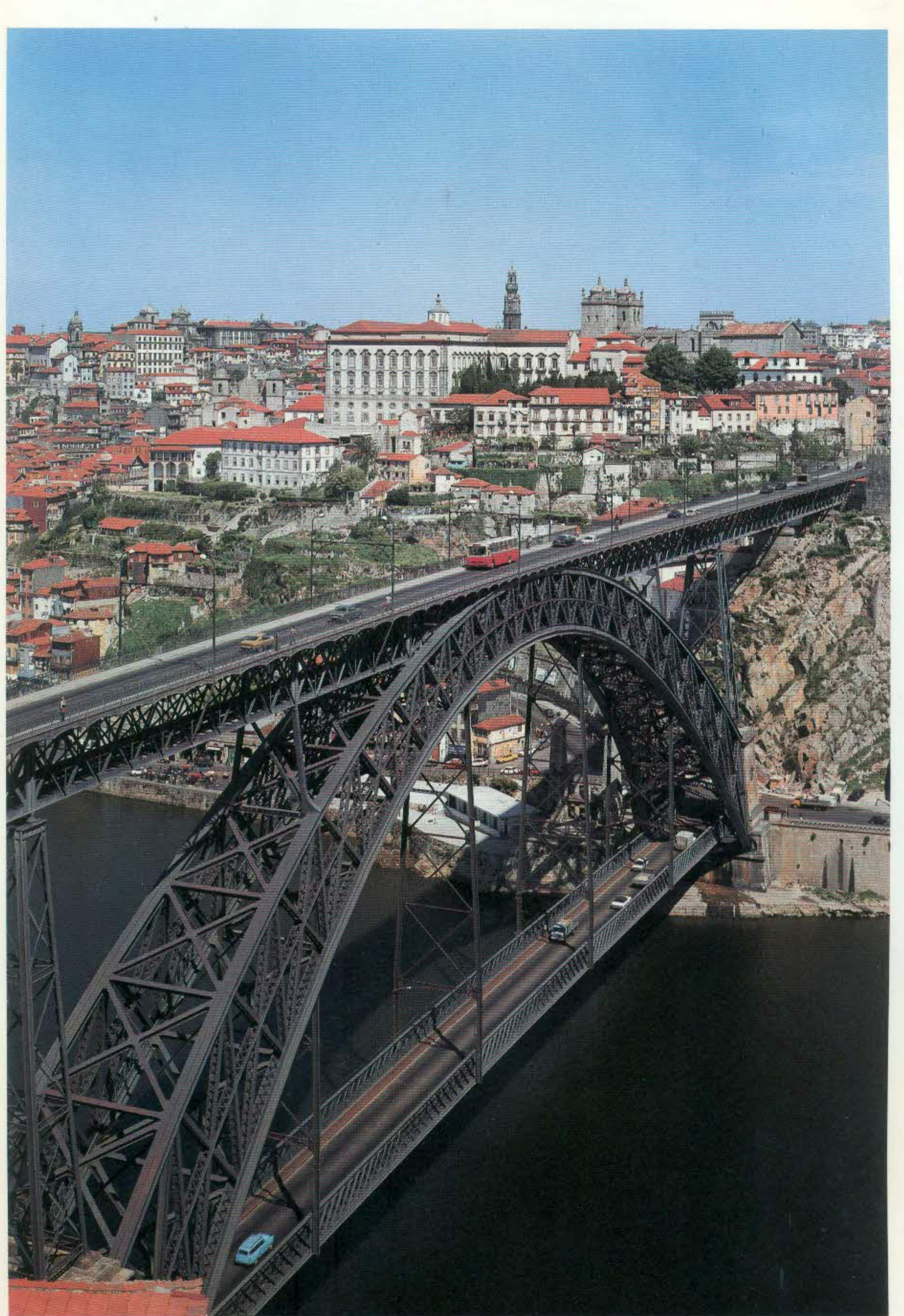
Puente de Clapper, Devon
Este puente sobre el río Dart oriental en Postbridge-on-Dartmoor, Devon, se construyó para comunicar Plymouth con la carretera de Moretonhampstead. Se cree que data del siglo XIII, cuando el tráfico de estaño y productos agrícolas adquirió desarrollo. Se utilizó piedra de los páramos, grandes bloques de granito sin tallar, apoyados en pilares y estribos del mismo material. Existen numerosos puentes similares en España, pero el más antiguo de este tipo que se conoce se encuentra en Esmirna, Turquía, sobre el río Meles, y se construyó hacia el 850 a.C.



Puente de la bahía de Sidney
Construido por Dorman & Long, Middlesbrough, Inglaterra, entre 1924 y 1932. El arco de acero, sostenido por pilares de granito, era vez y media más largo y necesitó el doble de acero que el arco más largo construido con anterioridad. El ojo mide 502 m y por él pasan 4 vías de ferrocarril y un carril de 17 m de anchura para automóviles. Para probarlo, se utilizaron 72 locomotoras de 7.600 t.



Gran puente de Seto
Inaugurado en 1988, para conectar por tren y carretera la más grande y la más pequeña de las cuatro principales islas japonesas, Honshu y Shikoku. Sus seis ojos y viaductos miden en total unos 12 kilómetros, lo que le convierte en el puente de doble plataforma más largo del mundo, por el que circulan automóviles y trenes. Tres de los seis ojos son colgantes, dos están sostenidos por cables, y el último es de viga convencional. Costó cerca de 8.180.000 dólares.

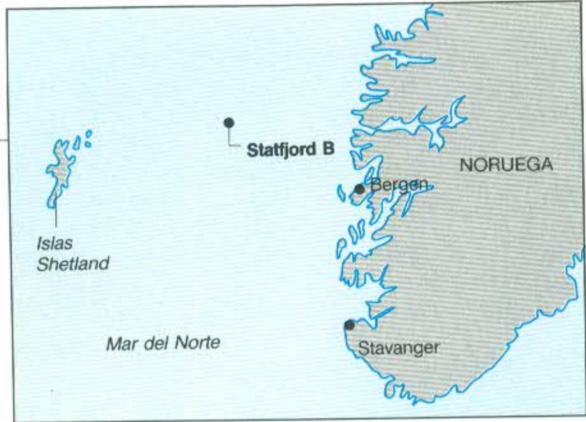


Puente de Luis I, Oporto

Este puente sobre el río Duero se terminó en 1885, siguiendo un diseño de T. Seyrig, que había colaborado con Gustave Eiffel en la construcción de un puente muy similar, el de Pía María, situado bastante cerca e inaugurado en 1877. El puente de Pía María tiene una sola plataforma para el paso de trenes, mientras que el de Luis I tiene una plataforma sobre el arco y otra debajo, que sirve de durmiente. El arco tiene una luz de 172 metros. Los dos puentes se construyeron con voladizos a partir de las orillas del río. Eiffel utilizó un diseño similar para su puente ferroviario de Garabit, Francia, que atraviesa una garganta a más de 120 metros de altura, lo que le convierte en el puente ferroviario de arco más alto del mundo.

Una gigantesca estructura submarina





Datos básicos

Cuando se inauguró, era el objeto artificial más grande jamás construido.

Constructor: Contratistas noruegos.

Fecha de construcción: 1978-1981.

Materiales: Hormigón y acero.

Altura: 271 m.

Peso: 824.000 t.

En agosto de 1981, el objeto artificial más pesado que jamás se ha transportado fue remolcado poco a poco desde los fiordos noruegos hasta el mar del Norte. Nos estamos refiriendo a la plataforma petrolífera Statfjord B, 824.000 toneladas de acero y hormigón, con una altura de casi 200 metros desde los tanques de almacenamiento del fondo hasta la plataforma para helicópteros situada en lo alto. Su construcción costó 1.840 millones de dólares.

Se necesitaron cinco remolcadores para tirar de la gigantesca plataforma, y otros tres para controlarla por detrás mientras pasaba a través de los fiordos, algunos de ellos muy estrechos. Una vez en alta mar, los tres remolcadores de atrás se retiraron, y los cinco de delante aceleraron hasta unos tres nudos. Al cabo de cinco días, tras haber recorrido 245 millas náuticas, la plataforma llegó a su destino, a 180 kilómetros al oeste de Songefjord y 185 kilómetros al nordeste de las islas Shetland. Se bombeó agua en los tanques y se asentó la plataforma en el fondo, a menos de 15 metros de la posición prevista.

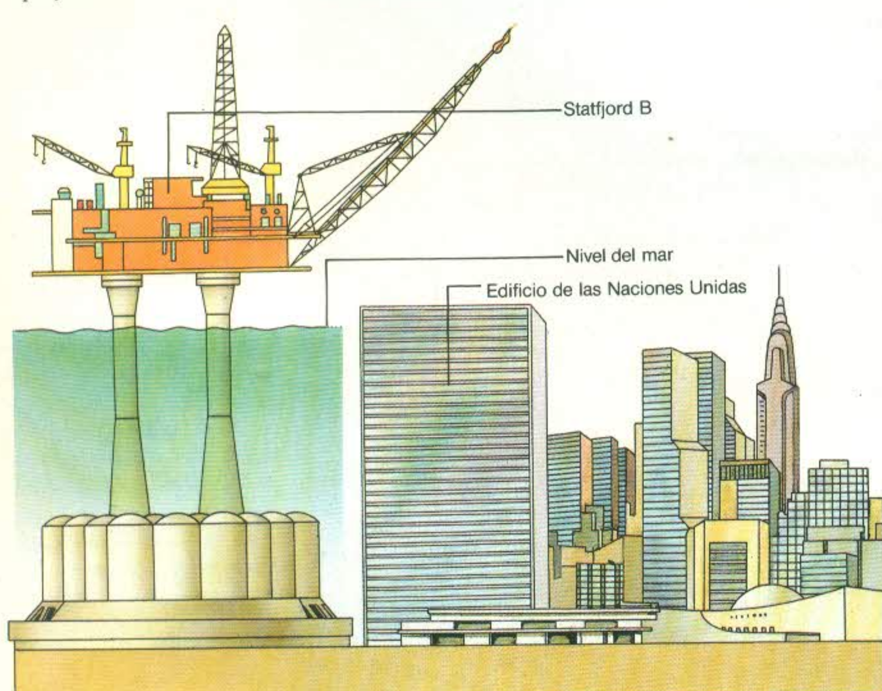
La Statfjord B era la estructura más grande construida en un período heroico de la ingeniería marítima. Como las plataformas petrolíferas del mar del Norte están tan aisladas y gran parte de su estructura se encuentra por debajo de la superficie, pocas personas se hacen una idea aproximada de lo enormes que son. Desde el fondo del mar hasta lo más alto de la torre de perforación, la Statfjord B tiene una altura de 271 metros, casi el doble que la gran pirámide de Keops y no muy por debajo de los 300 metros de la torre Eiffel. Pesa casi 115 veces más que esta última, nueve veces más que los mayores buques de guerra (los portaaviones del tipo Nimitz) y tres veces más que cada una de las torres del World Trade Center de Nueva York, el edificio de oficinas más grande del mundo. En tierra firme, un objeto semejante despertaría un enorme interés; en medio del mar del Norte, permanece casi ignorado.

La Statfjord B es una plataforma de gravedad, asentada sobre el fondo del mar por su propio e inmenso peso. La base consiste en 24 tanques de hormigón armado, construidos en un dique de carena de Stavanger. Sobre ellos se alzan cuatro patas huecas, también de hormigón. Y encima está montada una estructura de acero, la plataforma propiamente dicha, que pesa 40.000 toneladas, y que incluye todo el equipo necesario para perforar los pozos y producir 150.000 barriles de petróleo al día, más un hotel con 200 camas, donde viven los trabajadores, y un helipuerto en lo alto.

La base y la plataforma se construyeron por separado, y después se acoplaron en el mar, en una operación que exigía precisión absoluta. Las dos piezas se transportaron luego, flotando sobre barcazas, hasta Irkefjorden, un fiordo resguardado y de aguas profundas. El extremo superior de las cuatro patas debía acoplarse a cuatro tubos cortos que sobresalían del fondo de la plataforma. La maniobra más difícil consistía en situar la plataforma en posición exacta sobre la base hundida, y añadir lastre a las barcazas para hacer descender la plataforma, mientras al mismo tiempo se elevaba la base, extrayendo el agua de los tanques de almacenamiento. Manejar masas tan enormes con tanta exactitud y en el mar es una tarea que exige nervios bien templados. Las fuerzas de la inercia son tan tremendas que el más ligero error puede provocar un choque entre las dos gigantescas masas que arranque enormes fragmentos de hormigón. Pero en menos de 37 horas se había conseguido transferir a la base todo el peso de la plataforma, uniendo las dos partes con más de 100 pernos de 10 centímetros.

Tampoco resultó fácil instalar la plataforma en

El centro de Manhattan, sumergido a la misma profundidad que la Statfjord B, apenas sobresaldría de la superficie.

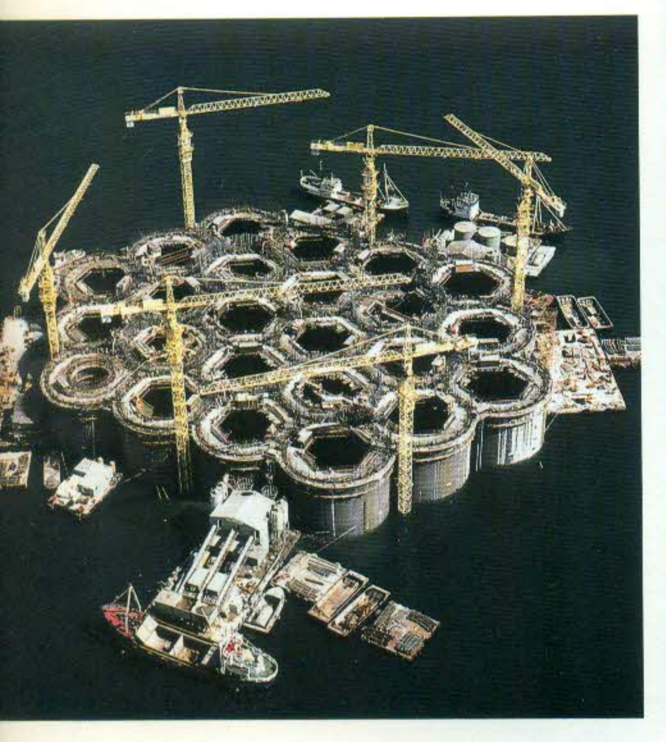



STATFJORD B
BLOKK 33/12

Una gigantesca estructura submarina

Statfjord B fue la primera plataforma marina de hormigón con cuatro patas. Una vez terminados los tanques de la base de una plataforma, se construyen uno, tres o cuatro pilares o «patas», con las mismas técnicas de vaciado en moldes que se utilizaron para los tanques, y se continúa hasta alcanzar la altura deseada. Los pilares tienen un diámetro interno de 23 metros en la base. Dos de ellos se utilizan para perforar, otro para la subida del petróleo, y el cuarto contiene las instalaciones de las bombas de carga y controles del agua de lastre.





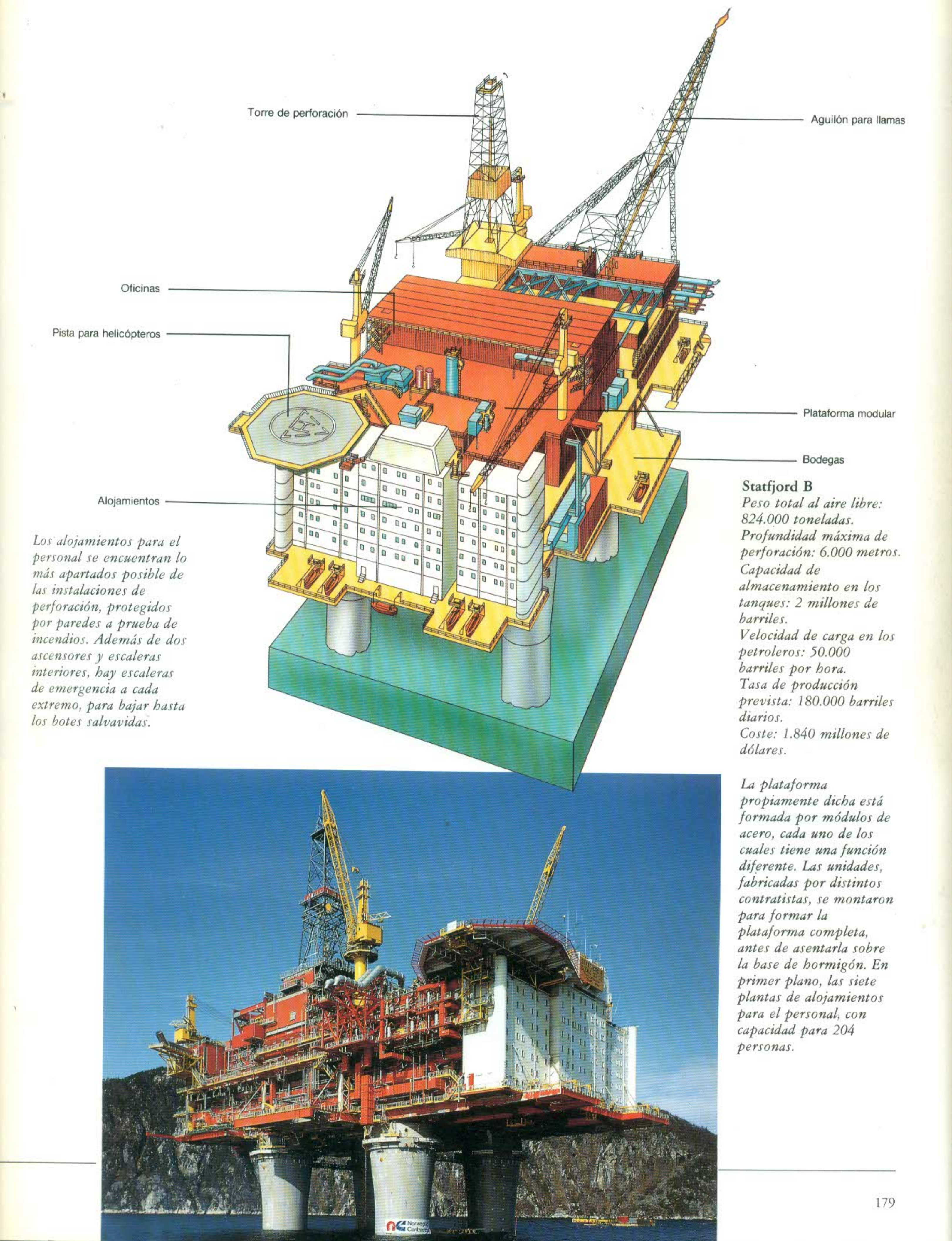
La estructura de la base consta de 24 tanques o cilindros de hormigón, en formación concéntrica. Cuatro de ellos se prolongan para formar los pilares de la plataforma; los otros 20 son tanques de almacenamiento de crudo, de 23 metros de diámetro por 64 de altura, que, además de facilitar las operaciones de carga, contribuyen a estabilizar la plataforma.

su emplazamiento definitivo. Una vez situada por el remolcador, se bombeó agua en los tanques de lastre para hundir la plataforma hasta el fondo del mar. El borde de acero que rodea la base penetró casi cuatro metros en el fondo al asentarse la plataforma. Seis remolcadores situados en círculo tiraban de la plataforma hacia afuera para mantenerla en posición mientras se añadía lastre. La operación se controló por medio de más de 100 sensores y aparatos de medición.

En cuanto el borde empezó a penetrar en el fondo del mar, se bombeó agua desde abajo, y por último se rellenaron los pequeños huecos existentes entre la base y el fondo del mar, bombeando hormigón. El resultado es una plataforma instalada en posición correcta y que se desvía menos de un grado de la verticalidad. Es capaz de resistir los peores ataques que el mar del Norte pueda lanzar contra ella —olas de 30 metros de altura y vientos de más de 160 kilómetros por hora— sin oscilar ni un centímetro.

Las plataformas como la Statfjord B son mundos aparte, universos de ruido y energía en incesante actividad. Las turbinas de gas generan suficiente electricidad para abastecer a una ciudad pequeña, y por dentro de las enormes patas de hormigón corre un laberinto de tubos y cables de increíble complejidad. Dos de las patas de Statfjord B se utilizan para perforar los 32 pozos, que no descienden en vertical, sino que se curvan en amplias parábolas para llegar a todos los rincones del campo petrolífero. Otra de las patas, donde se encuentran las bombas y las entradas de los conductos, consta de 13 plantas separadas, comunicadas mediante ascensores.

Si alguien mirase hacia arriba desde las turbias y oleosas aguas del fondo, a cientos de metros bajo la superficie del mar, se sentiría, como ha escrito el poeta Al Álvarez, «como en el fondo de una de las prisiones imaginarias de Piranesi: un enorme y tenebroso espacio cerrado, con pasillos, galerías y extrañas y ominosas maquinarias, todo ello desproporcionado para las dimensiones humanas».



Los alojamientos para el personal se encuentran lo más apartados posible de las instalaciones de perforación, protegidos por paredes a prueba de incendios. Además de dos ascensores y escaleras interiores, hay escaleras de emergencia a cada extremo, para bajar hasta los botes salvavidas.

Statfjord B
Peso total al aire libre: 824.000 toneladas.
Profundidad máxima de perforación: 6.000 metros.
Capacidad de almacenamiento en los tanques: 2 millones de barriles.
Velocidad de carga en los petroleros: 50.000 barriles por hora.
Tasa de producción prevista: 180.000 barriles diarios.
Coste: 1.840 millones de dólares.

La plataforma propiamente dicha está formada por módulos de acero, cada uno de los cuales tiene una función diferente. Las unidades, fabricadas por distintos contratistas, se montaron para formar la plataforma completa, antes de asentarla sobre la base de hormigón. En primer plano, las siete plantas de alojamientos para el personal, con capacidad para 204 personas.

Generadores del futuro





Datos básicos

El generador eólico más potente del mundo.

Constructor: Wind Energy Group.

Fecha de construcción: 1985-1987.

Material: Hormigón.

Altura: 44 m.

Longitud del rotor: 59,5 m.

El viento se ha venido aprovechando como fuente de energía desde el siglo VII d.C., cuando aparecieron en Persia los primeros molinos de viento. Desde los tiempos medievales hasta la invención de las máquinas de vapor, los molinos de viento y de agua representaron la cumbre de la tecnología: máquinas capaces de moler grano y bombear agua, mucho más potentes que la fuerza humana o animal. Se ha calculado que hacia 1840 existían en Inglaterra y Gales unos 10.000 molinos de viento en funcionamiento.

Pero estas hermosas máquinas tienen poco en común con los nuevos modelos de generadores eólicos, diseñados para producir electricidad, y que se vienen construyendo desde el comienzo de la década de los setenta como respuesta al encarecimiento de los combustibles fósiles y a la creciente inquietud por la poca seguridad de la energía nuclear. Es muy poco probable que puedan llegar a generar más del 5-10 por 100 de las necesidades energéticas de los países desarrollados, pero ese porcentaje representa ya un mercado significativo. Con los actuales costes de construcción, el 5 por 100 del suministro energético de Gran Bretaña representa 6.000 millones de libras en contratas de construcción, lo cual explica el interés mostrado por tantas grandes empresas.

Para aportar una contribución útil a la producción nacional de electricidad —algo muy diferente de abastecer viviendas o comunidades aisladas con un suministro intermitente—, los generadores eólicos tienen que ser muy grandes. El primero que intentó construir una de estas máquinas fue el ingeniero norteamericano Palmer Putnam, en los años cuarenta. En lo alto de una colina de 600 metros de altitud llamada Grandpa's Knob, en las montañas Verdes del centro de Vermont, Putnam construyó una torre de 33 metros de altura, con un rotor en forma de hélice de dos aspas montado en lo alto. Estaba diseñada para generar 1,25 megavatios, una producción considerable, y empezó a funcionar de manera experimental en octubre de 1941.

Este generador no dio muy buenos resultados: sufrió numerosas averías y por fin dejó de funcionar en marzo de 1945, al desprenderse una de las aspas. Desde entonces, los problemas de Grandpa's Knob se han repetido en numerosas ocasiones, porque las fuerzas fluctuantes que actúan en la base de las aspas provocan fatiga de los metales, que es la causa de las fracturas y averías de la máquina. Las experiencias más recientes parecen indicar que este problema aún no se ha resuelto por completo.

Son muchos los ingenieros que han seguido los pasos de Palmer Putnam. El generador eólico más grande del mundo se inauguró en noviembre de 1987 en lo alto de la colina Burgar, en la mayor de las islas Orcadas, frente a la costa de Escocia. Se llama LS-I y tiene un rotor de dos aspas montado en lo alto de una torre de hormigón de 44 metros de altura. Está diseñado para generar un máximo de 3 megavatios, y a lo largo del año produce electricidad suficiente para abastecer a 2.000 viviendas conectadas a la red de las Orcadas.

El LS-I fue construido por el Wind Energy Group, una empresa mixta en la que participan Taylor Woodrow, la GEC y British Aerospace. El gigantesco rotor lo construyó British Aerospace en su fábrica de Hatfield. Mientras tanto, se había ido levantando la torre con técnicas tradicionales de moldeado de hormigón. En lo alto se instaló un tronco de acero de seis metros de altura y 33 toneladas de peso, que contiene el generador eléctrico. Todo esto lo construyó Seaforth Maritime en Escocia. Y sobre el tronco se montó una barquilla de 66 toneladas, construida por British Aerospace, que incluye el rotor, los engranajes primarios, los cojinetes y el freno.

La máquina de las Orcadas, como todos los grandes generadores eólicos, está diseñada para producir un rendimiento homogéneo en una amplia gama de velocidades del viento. Con brisas de menos de 25 km/h, o fuerza 3 en la escala Beaufort, no funciona. Por encima de esa velocidad, el rotor se pone en marcha, y alcanza su máxima potencia, de 3 mw, con vientos de 60 km/h.

Cuando el viento es muy fuerte, de más de 95 km/h o fuerza 10, la máquina se desactiva para evitar averías. La construcción está diseñada para resistir vientos huracanados de hasta 250 km/h. Con vientos normales, de unos 38 km/h a la altura de la hélice, la máquina genera 9.000 megavatios-hora al año, que equivalen a un rendimiento continuo de 1 megavatio durante 24 horas al día, todos los días del año.

La energía del rotor se transmite en primer lugar al engranaje primario instalado en la barquilla. Este engranaje transmite la energía hacia abajo, a través de un engranaje secundario que la hace llegar al generador. El rotor gira a una velocidad de 34 rpm —aproximadamente como un disco de larga duración en un tocadiscos—, pero



Generadores del futuro

los dos engranajes multiplican la velocidad hasta llegar a 1.500 rpm en el generador. La velocidad del generador viene determinada por la necesidad de sincronizar su salida de energía con los 50 ciclos por segundo de la red eléctrica. La máquina, que todavía se encuentra en fase experimental, está equipada con numerosos contadores que miden la producción de energía, la carga sobre las aspas del rotor, la velocidad del viento y otras variables. Las señales se transmiten por cable de fibra óptica a una base de datos situada a unos 100 metros de la máquina.

Aunque el LS-I es el generador más grande construido hasta la fecha, existen otros casi iguales en Suecia, Alemania y los Estados Unidos. Hasta ahora, los resultados obtenidos con estas enormes máquinas han sido irregulares. El problema de la fatiga ha acabado con varios generadores, y otros han tenido dificultades para sincronizar su salida de energía con la red, un requisito imprescindible para que resulten útiles como abastecedores de energía. La red suministra una corriente alterna que invierte su dirección 50 veces por segundo, y las nuevas centrales de energía tienen que sincronizarse con las ya existentes, de manera que coincidan las crestas y valles de todo el suministro eléctrico.

No ha resultado fácil conseguir esto con los generadores eólicos, porque su velocidad no es absolutamente constante. La fuerza de la gravedad hace que las aspas reduzcan ligeramente la velocidad al subir y aceleren al bajar, lo cual puede provocar fluctuaciones en el rendimiento, que dificultan la sincronización. En el LS-I, un acoplamiento hidráulico entre el rotor y el engranaje amortigua las oscilaciones.

Hasta ahora, la experiencia con máquinas más pequeñas ha resultado más positiva. La mayor concentración de generadores pequeños se da en el estado de California, donde las «granjas eólicas» proporcionan ya energía a 20.000 hogares, ahorrando 2.200.000 barriles de petróleo al año. Uno de los lugares donde más abundan es en Altamont Pass, cerca de San Francisco, donde el viento sopla de manera casi continua y el paisaje está salpicado de miles de generadores eólicos. En 1988 existían en California 16.000 turbinas que generaban electricidad, casi todas en la gama de 150 a 300 kilovatios, muy inferior a la del LS-I. Los incentivos fiscales han favorecido esta experimentación, tanto en los EE UU como en Dinamarca y los Países Bajos.

A largo plazo, el futuro de la energía eólica dependerá del buen funcionamiento, los costes y el bajo impacto ambiental. Con respecto al precio, la mayoría de los estudios actuales parece indicar que la electricidad eólica podrá competir con la generada a partir del carbón o la energía nuclear, pero que no será mucho más barata. La experiencia demuestra que los grandes generadores necesitarán muchas reparaciones, y que estarán sin funcionar aproximadamente una tercera parte de sus vidas. Otro aspecto clave de la energía eólica es el impacto sobre el medio ambiente. Aunque los entusiastas de las fuentes alternativas de energía prefieren decididamente la energía eólica al carbón, el petróleo o la energía nuclear, aún no se sabe si el público en general aceptará de buen grado la presencia de gigantecas turbinas eólicas en todos los lugares ventosos y a lo largo de las costas. Para influir de manera significativa en el consumo total de energía, habría que construir cientos, e incluso miles de máquinas como el LS-I, cada una de las cuales necesita un espacio bastante amplio. No se pueden instalar muy cerca unas de otras, porque eso reduciría el viento y aumentaría las irregularidades. Puede que las granjas eólicas sean verdes, pero ¿será totalmente benigno su efecto sobre el medio ambiente? Se trata de una pregunta peliaguda, a la que los ecologistas todavía no han encontrado respuesta.

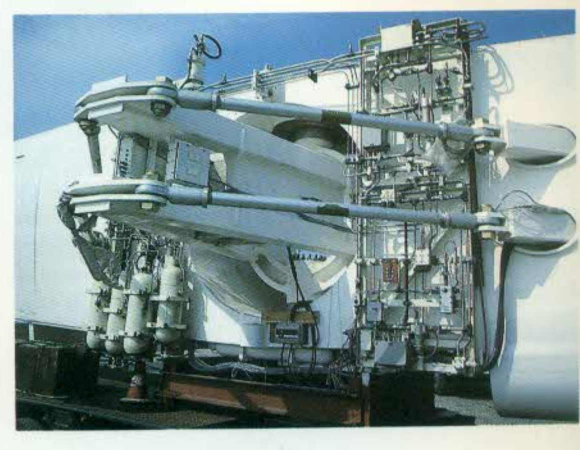


Construcción del LS-1 en la colina Burgar (arriba). Las Orcadas constituyen un emplazamiento ideal, a causa de los fuertes vientos reinantes y las frecuentes galernas. Aunque no es éste el primer generador eólico construido en Burgar, se trata del más grande con diferencia. En la fotografía se puede ver uno de sus antecesores, el MS-1, que tiene un rendimiento de 250 kw, muy inferior a los 3 mw del LS-1.

El rotor, hecho de acero y plástico reforzado con fibra de vidrio, está formado por cinco secciones y pesa 63 toneladas. Mide 59,5 metros de punta a punta, más que la envergadura de un avión Boeing 747. Las tremendas fuerzas que actúan sobre el rotor hacen que éste sea el componente más vulnerable a la fatiga de los metales.

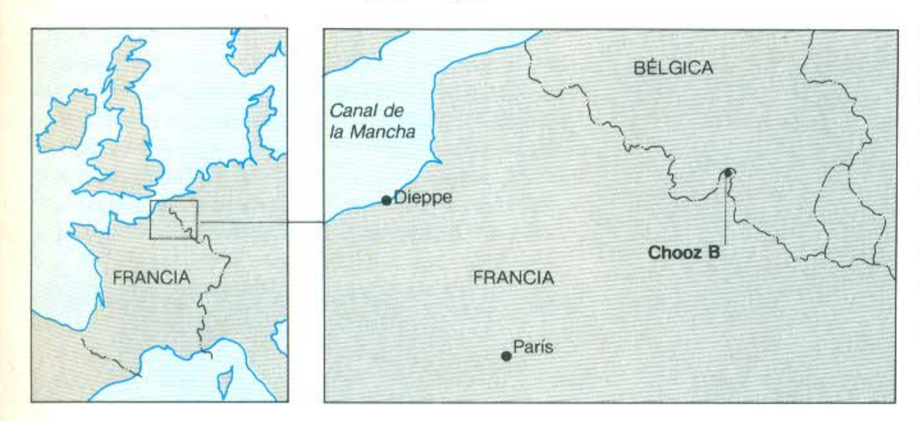


El montaje del rotor se llevó a cabo en un gran hangar, donde se sometió a pruebas estáticas y dinámicas, antes de desmontarlo y transportarlo a las Orcadas. El ángulo de inclinación del rotor se puede ajustar mediante un mecanismo hidráulico encajado en el eje. El tercio exterior de las aspas se puede girar para ajustar su velocidad a un rendimiento constante.



Un montacargas interior permitió elevar el rotor hasta la barquilla, para allí conectarlo al engranaje primario. La barquilla, de 65 toneladas, y el tronco de 32 toneladas que contiene el generador se instalaron por medio de grúas. Un ascensor para cuatro personas permite al personal de mantenimiento subir hasta la barquilla.

El gigante nuclear



Datos básicos

La central nuclear más grande de Europa.

Constructor: Electricité de France.

Fecha de construcción: Desde 1982.

Producción: 2.800 megavatios.

Extensión de las instalaciones: 134 h.

En ninguna otra modalidad de ingeniería se combinan la potencia y la precisión como en las centrales nucleares. Se trata de máquinas inmensas, que cuestan miles de millones, con capacidad suficiente para abastecer de electricidad a una gran ciudad. Sin embargo, están montadas con precisión de relojería y con unas condiciones de limpieza comparables a las de un hospital. La mayor de toda Europa, y una de las mayores del mundo, es la Chooz B, que, cuando quede terminada, en 1993, generará 2.800 megavatios por medio de dos reactores de agua a presión, instalados en un meandro del río Mosa, en territorio francés, cerca de la frontera con Bélgica.

La energía nuclear ha vivido malos tiempos desde 1979. Los accidentes de Isla de las Tres Millas en 1979 y de Chernóbil en 1986 han dejado patentes las consecuencias que acarrea un error en una tecnología que ofrece mucho, pero a un alto precio. Muchas naciones han abandonado por completo la construcción de centrales nucleares, pero no Francia, que posee uranio pero carece de carbón y petróleo, por lo que a principios de los años setenta emprendió un ambicioso plan de inversiones nucleares.

En 1973, Francia producía con sus propios recursos menos de una cuarta parte de la energía que consumía. En 1986, producía ya el 46 por 100, y se espera que en la década de los noventa el porcentaje supere el 50 por 100. Lo ha conseguido a base de construir centrales nucleares en todos los ríos importantes de Francia y a lo largo de la costa. En la actualidad, existen en Francia más de 50 reactores en funcionamiento. Los tres más grandes, que aún no están terminados, se encuentran en Chooz, sobre el río Mosa, y en Civaux, sobre el Vienne. En Chooz, donde ya existe un reactor más pequeño —el Chooz A—, se instalarán dos reactores de 1.400 mw; en Civaux, sólo uno.

Parte del éxito obtenido por Francia en este gigantesco y costoso programa se ha debido a la política de construir un único tipo de reactor, aumentando el tamaño poco a poco, lo cual ha permitido adquirir una considerable experiencia. El reactor de agua a presión es un invento patentado por Westinghouse en los Estados Unidos, basado en los reactores que sirven para impulsar los submarinos nucleares. Pero los franceses no vacilaron en abandonar sus diseños nacionales en favor de un reactor norteamericano. Desde entonces, el diseño se ha perfeccionado considerablemente.

Todas las centrales nucleares tienen varios elementos en común: el combustible de uranio, por lo general en forma de bolitas de dióxido de uranio; un refrigerante para eliminar el calor producido por la reacción nuclear y generar vapor; y un moderador, cuya función consiste en frenar los neutrones liberados por la fisión nuclear y mejorar el funcionamiento del reactor. En un reactor de agua a presión, el agua se utiliza como refrigerante y como moderador. El calor generado por el combustible se transfiere al agua que llena un tanque de acero, a una presión aproximada de 130 atmósferas. La temperatura del agua asciende de 300° C, pero la enorme presión impide que el agua hierva. Unos tubos la hacen pasar a un generador de vapor, donde transfiere su calor a un segundo conjunto de tubos por los que también circula agua. Este agua, que no está sometida a presión, sí que hierve, produciendo vapor que hace funcionar los turbo-generadores que producen electricidad.

El componente más delicado de un reactor de agua a presión es el tanque de presión, ya que si ocurriera en él un accidente, podría producirse un importante escape de material radiactivo al edificio del reactor, y quizá también al mundo exterior. Los tanques de presión de la central Chooz B, típicos de su clase, son cilindros de 13 metros de altura, con un diámetro interior de 4,5 metros. Están hechos de acero de casi 25 cm de grosor y pesan 462 toneladas. En lo alto tienen una tapa en forma de cúpula, que se atornilla con fuerza durante el funcionamiento normal, pero que puede separarse para cambiar el combustible, operación que en Chooz B se realiza una vez al año. Tanto el tanque de presión como las tuberías por las que entra y sale el agua refrigerante tienen





El gigante nuclear

que estar fabricados con los más altos criterios de calidad. Hasta ahora, tanta precaución ha valido la pena: no se han producido fallos catastróficos en los tanques de presión de ningún reactor nuclear comercial.

En el interior del tanque de presión hay una red de varillas de combustible, de unos 4,2 metros de longitud y sólo 1 cm de diámetro. En el interior de cada varilla hay bolitas de dióxido de uranio, en las que la proporción de uranio-235 fisionable se ha aumentado por medios artificiales hasta un 3 por 100, aproximadamente. Las varillas están dispuestas en grupos de 264 unidades, montadas en una rejilla con espaciadores. El reactor de Chooz B tiene 205 conjuntos, con un total de 54.120 varillas de combustible. Estos conjuntos ocupan la mitad inferior del tanque de presión, y están rodeados por una vaina metálica. El agua que circula por las tuberías de arriba se dirige al fondo del tanque, pasando entre la vaina y las paredes, y luego sube por el centro, por los huecos que quedan entre las varillas. Al subir, absorbe el calor de las varillas de combustible, aumentando de temperatura antes de salir por otro conjunto de tuberías que conducen al generador de vapor.

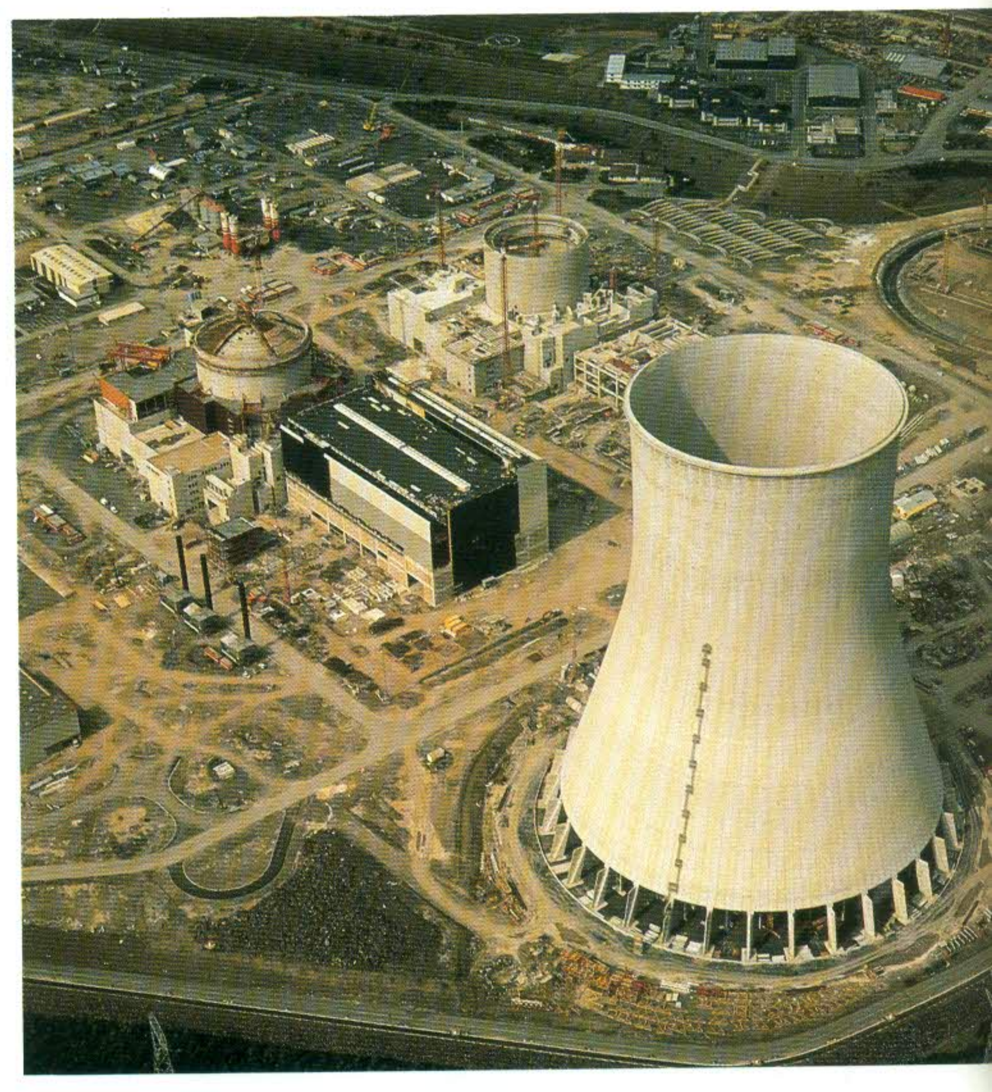
El reactor de agua a presión tiene un diseño muy completo, y todo el calor se genera en un volumen relativamente pequeño. Por lo tanto, es imprescindible mantener un flujo constante de agua, ya que si se interrumpiera un momento, el reactor podría sobrecalentarse y derretirse. La refrigeración debe mantenerse incluso después de desactivar el generador, porque la degeneración radiactiva sigue produciendo un calor intenso. Por esta razón, los reactores de agua a presión siempre están equipados con sistemas de emergencia para refrigerar el núcleo, independientes de los circuitos normales, para garantizar una refrigeración adecuada en todo momento.

Las enormes estructuras que se alzan sobre los reactores de Chooz B son torres de refrigeración. Según las leyes de la termodinámica, no todo el calor generado por el combustible nuclear se puede transformar en electricidad; más de la mitad se pierde.

La función de las torres de refrigeración consiste en absorber el calor del agua y dispersarlo en el aire. El aire penetra por abajo y sube por el efecto chimenea hasta lo alto de la estructura. Mientras tanto, se rocía agua caliente sobre una red de paletas de hélice, entre las cuales asciende el aire. El resultado es que el aire se calienta y sale por lo alto de la torre en forma de nube cargada de vapor de agua, mientras el agua se enfría. El agua así enfriada se descarga en el río Mosa; pero todavía no está fría del todo, y puede elevar un grado la temperatura del río. Según Electricité de France, el calentamiento es demasiado pequeño para tener efectos apreciables sobre la vida fluvial.

El último elemento fundamental de la central es el turbo-generador que transforma el vapor en electricidad. Los turbo-generadores de Chooz B son de los más grandes que jamás se hayan construido, capaces de generar 1.400 mw; y pesan 3.150 toneladas. En un extremo hay una turbina de vapor, en la que el vapor se expande a través de una serie de ventiladores dispuestos a lo largo de un eje común, haciéndolo girar a 1.500 rpm. Al otro extremo de la máquina, acoplado al mismo eje, hay un generador eléctrico que produce la electricidad.

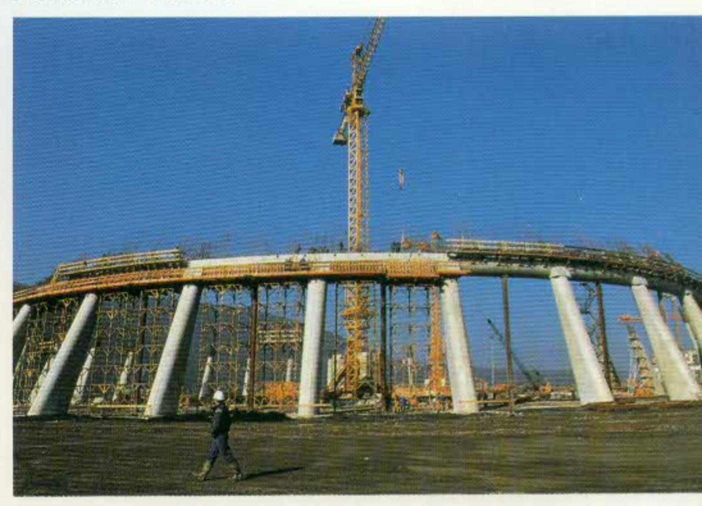
Está previsto que la construcción de Chooz B dure diez años, con un coste de 15.000 millones de francos. En las obras trabajarán unas 1.600 personas. Una vez en funcionamiento, necesitará una plantilla de 500 a 550 trabajadores. Las obras comenzaron en julio de 1982, y se espera que el primer reactor empiece a funcionar en 1991; el segundo no se pondrá en marcha hasta 1993.



Las torres de refrigeración son una característica común de las centrales nucleares instaladas en tierra firme y de las que utilizan carbón como combustible. Las centrales nucleares costeras suelen desprenderse del exceso de calor vertiendo agua caliente en el mar, donde sus efectos son mínimos. Las instaladas a orillas de un río no pueden hacer esto, porque el agua del río se calentaría, provocando terribles daños ecológicos.



El anillo basal de una torre de refrigeración (abajo), con los pilares anti-turbulencia en forma de aletas, que parecen demasiado endebles para sostener la torre de hormigón. Todo el suelo de la torre está ocupado por la maquinaria de intercambio calórico.





Los reactores están rodeados por una bóveda de hormigón, encerrada en una estructura de paredes dobles (arriba), el edificio de contención, lo cual proporciona una serie de capas protectoras que aíslan la radiación en caso de escape, para que no salga al mundo exterior.

Parte de un generador de vapor (derecha), que utiliza el calor generado por el reactor de agua a presión para producir vapor en un sistema secundario, que a su vez hace funcionar el turbo-generador. Cada generador contiene 5.600 tubos en forma de U.



La cúpula que cubre el reactor de agua a presión tiene dos cubiertas, reforzadas con acero antifractura (arriba). Para cada reactor, con su depósito de combustible y su torre de refrigeración, se necesitan casi 200.000 metros cúbicos de hormigón.

El aprovechamiento del sol





Datos básicos

La central de energía solar más grande de Europa.

Constructor: Centro Nacional Francés de Investigaciones Científicas.

Inicio del proyecto: 1969.

Material: Cristal.

Superficie de espejos: 1.850 m^2.

La cantidad de energía que llega a la tierra procedente del sol es muchas veces superior a la que utilizamos los seres humanos que poblamos el planeta. Sólo en las carreteras y autopistas de los Estados Unidos cae más del doble de la energía que se consume en todo el mundo procedente del carbón y el petróleo. Pero la energía solar llega muy repartida: la cantidad que cae sobre un metro cuadrado en un día soleado asciende como máximo a 1.000 vatios; en días nublados, puede llegar sólo la quinta parte.

Para poder aprovechar eficazmente la energía solar, es preciso concentrarla. Este principio se conoce desde tiempos muy antiguos. Se dice que Arquímedes consiguió incendiar las naves romanas que atacaban Siracusa en 214 a.C., reflejando sobre ellas los rayos solares mediante un sistema de espejos instalados en la costa. Los atenienses y los aztecas encendían sus fuegos sagrados con ayuda de espejos cóncavos, e innumerables excursionistas han encendido sus hogueras con lentes convexas. En el siglo XVIII, un físico suizo, Horace-Benedict de Saussure, cocinó una sopa —la historia no dice de qué clase— utilizando una serie de lentes para enfocar los rayos del sol hacia un horno; y el famoso químico Lavoisier construyó en 1772 un horno solar utilizando dos lentes montadas sobre un carro de madera. Con este artilugio consiguió temperaturas por encima de los 1.500° C.

La utilización de la energía solar parece haber fascinado de manera especial a los franceses. En 1945, el Centro Nacional Francés de Investigaciones Científicas (CNRS) encargó al químico Felix Trombe, especializado en el estudio de materiales refractarios con un punto de fusión muy alto, que estudiara a fondo el tema. Trombe utilizó una vieja pantalla de radar de 1,80 m de diámetro, con el interior plateado para que reflejara la luz, y logró obtener temperaturas superiores a los 3.000° C. En vista del éxito de sus experimentos, se instaló un laboratorio en Montlouis, Pirineos occidentales, para proseguir allí las investigaciones. Muy cerca, en Odeillo, se construyó uno de los hornos solares más impresionantes y eficaces del mundo, que empezó a funcionar en el año 1969.

El horno de Odeillo está formado por una serie de espejos planos, dispuestos en terrazas sobre la ladera de una montaña, que reflejan los rayos de sol sobre un espejo parabólico de 42 metros de anchura. Existen en total 63 espejos planos, o helióstatos, ordenados en ocho terrazas. Los helióstatos pueden girar horizontal y verticalmente para seguir la trayectoria del sol y lograr que sus rayos se reflejen siempre sobre el espejo parabólico central. El movimiento se lleva a cabo de manera automática, por medio de un sistema hidráulico controlado por ordenador.

El espejo parabólico está fijo y enfoca la luz que cae sobre él. Lo característico de los espejos parabólicos es que los rayos paralelos de luz, al reflejarse, pasan todos por el mismo punto, que se llama foco; en Odeillo, el foco se encuentra a 17,5 metros del espejo parabólico, que a su vez está formado por 9.500 espejos pequeños, de menos de 45 cm de lado, con una superficie total de 1.850 metros cuadrados. La luz que refleja este espejo se dirige hacia el horno, instalado en una torre en el punto focal. El calor no se concentra todo en un punto único, sino en una zona de unos 40 cm de diámetro, lo cual genera temperaturas altísimas, de hasta 3.800° C.

Como la atmósfera de los Pirineos es muy pura, se deposita muy poca suciedad sobre los espejos, y la lavan la escarcha y la nieve. Los helióstatos sólo tienen que limpiarse cada dos años, y el espejo parabólico sólo se limpió dos veces en los primeros 16 años. El horno funciona unas 1.200 horas al año, y su maquinaria hidráulica y controles electrónicos necesitan pocas reparaciones.

En la torre situada frente al espejo fijo se encuentra el horno que recibe los rayos solares concentrados por el espejo.





El aprovechamiento del sol

La ventaja del horno solar radica en la intensidad de la fuente de calor y en su gran pureza. A diferencia de otros métodos que también permiten alcanzar temperaturas igual de altas, no existe peligro alguno de contaminación, un factor que ha resultado muy útil para fabricar materiales como el semiconductor de óxido de vanadio utilizado por Kodak en ciertas películas fotográficas.

También se puede emplear para investigar la resistencia de los materiales a cambios bruscos de temperatura. Utilizando pantallas frías especiales, se puede activar y desactivar el calor en un período de tan sólo una décima de segundo, provocando ciclos muy rápidos de calentamiento y enfriamiento, capaces de fracturar casi cualquier material. De este modo se han puesto a prueba los azulejos térmicos que se utilizan para proteger las lanzaderas espaciales norteamericanas cuando vuelven a penetrar en la atmósfera, así como los materiales protectores que recubren los misiles.

Por supuesto, el calor concentrado del sol puede tener otras aplicaciones. Si se utiliza para producir vapor, podrá generar electricidad y sustituir al carbón, el petróleo y las centrales nucleares. Cerca de Odeillo existe una central energética de 2,5 megavatios basada en este principio. Dispone de 200 espejos ordenados en semicírculo, que reflejan la luz del sol hacia una torre de 100 metros de altura. Se trata de la central de energía solar más grande de Europa, pero en Barstow, California, existe una instalación mucho mayor, llamada Solar I.

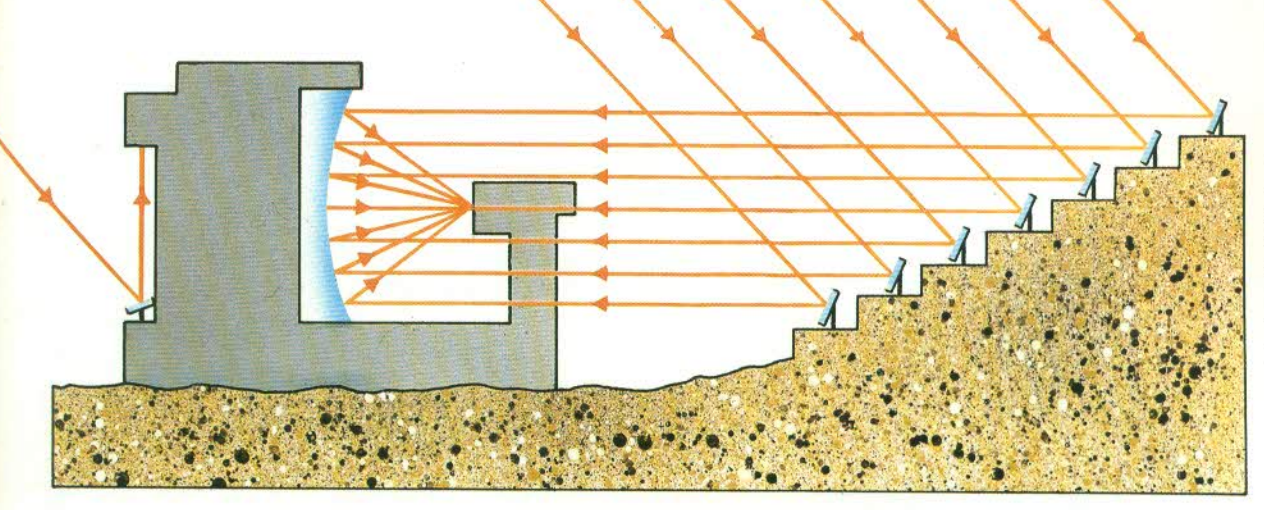
En Solar I se utilizan 1.818 espejos para reflejar la luz del sol hacia una caldera instalada en lo alto de una torre de 78 metros de altura. Las primeras pruebas se llevaron a cabo en 1982. Su construcción costó 141 millones de dólares, pero ahora Solar I es capaz de generar 10 megavatios. Se encuentra situada en el desierto de Mojave, donde disfruta de más de 300 días de sol al año; pero ocupa unas 40 hectáreas de terreno, lo cual indica la gran cantidad de espacio que necesita una central de energía solar, incluso en condiciones ideales. Para generar de este modo todo el suministro de energía de los Estados Unidos habría que llenar de estaciones solares casi todas las zonas desérticas. Las naciones menos favorecidas por el sol, como Gran Bretaña, no disponen de espacio suficiente para justificar este tipo de instalaciones.

A diferencia de la de Odeillo, la estación de Barstow no tiene espejo parabólico compuesto, sino que la luz se refleja sobre un receptor único, montado en lo alto de la torre. Este receptor consta de una serie de tubos, pintados de negro para que absorban mejor la energía, por los cuales circula un fluido. En los casos más sencillos, el fluido puede ser agua, que se transforma en vapor por acción del calor; luego, el vapor se utiliza para generar electricidad en turbinas convencionales. Otra posibilidad es utilizar sales fundidas, que constituyen un excelente medio para almacenar calor y evitan el problema que plantea la formación del vapor a alta presión en lo alto de la torre. Los rayos solares concentrados calientan la sal, que circula por tuberías hasta el suelo, donde transmite su calor al agua, para formar el vapor necesario para generar electricidad.

La central de Barstow ha dado muy buenos resultados, y ello ha abierto el camino en EE UU a una serie de proyectos tendentes a sustituir las calderas convencionales de las centrales energéticas por torres de energía solar. Un estudio realizado en los 16 estados del suroeste da a entender que de este modo se podrían aprovechar hasta 13.000 megavatios de energía solar, lo cual permitiría prescindir del 11 por 100 del petróleo y el gas que se consumen actualmente en las centrales eléctricas.



El tamaño que deben tener los espejos para generar energía en cantidades comerciales (arriba) hace que interfieran con el paisaje e impide que se construyan más instalaciones de este tipo. Sin embargo, al aumentar el precio de los combustibles fósiles, la energía solar se irá convirtiendo en una alternativa cada vez más rentable.



Cuando el horno funciona a la máxima potencia, la intensidad de la radiación solar en el punto focal del espejo es 12.000 veces superior a la de los rayos de sol normales; en condiciones normales, es sólo 2.000 veces superior.

Las baterías de helióstatos (derecha), espejos planos que reflejan los rayos de sol sobre el espejo parabólico principal, necesitan mucho espacio y se disponen de manera escalonada para obtener un máximo de eficiencia. En Odeillo, cada helióstato mide 6 × 7,3 metros, lo cual representa una superficie total de 2.780 metros cuadrados.





En los climas templados (izquierda), la abundancia de días nublados constituye el principal obstáculo para el aprovechamiento de la energía solar. No obstante, el sol proporciona tanta energía que vale la pena seguir investigando al respecto: la energía solar que llega a la Tierra en dos semanas equivale al total de las reservas iniciales de carbón, petróleo y gas natural.

CAPÍTULO CUATRO

Maravillas de la ingeniería subterránea

CONOCEMOS mejor la superficie de la Luna que la tierra situada a 15 kilómetros bajo nuestros pies. A pesar de los grandes logros de la ingeniería, la corteza terrestre continúa siendo un territorio desconocido, en el que muy rara vez nos aventuramos. Aún más remotos son el manto y el núcleo situados bajo la corteza. Los pozos más profundos que se han perforado no llegan a más de 15 kilómetros de profundidad, y eso con grandes dificultades. Los intentos de alcanzar la discontinuidad de Mohorovicic —donde termina la corteza y comienza el manto— se interrumpieron definitivamente en los años sesenta, al dispararse los costes del proyecto.

Se trata de una situación con la que los ingenieros de túneles están familiarizados. Ahora que el túnel del canal de la Mancha está a punto de franquear por fin la barrera que separa Gran Bretaña del resto de Europa, las dificultades económicas y técnicas de la construcción de túneles no dejan en ningún momento de ponerse a prueba. Prácticamente, no existe en el mundo ningún túnel que no haya costado más de lo presupuestado. En Japón, donde hace pocos años se construyó el túnel de ferrocarril más largo del mundo, a un coste exorbitante, las obras duraron tanto que las líneas aéreas habían acaparado mientras tanto casi todo el tráfico. Para agravar las cosas, el túnel había salido tan caro que no quedaba dinero para construir el carril

para el «tren bala», que habría permitido atraer de nuevo a los pasajeros. Parece que no existe una fórmula que garantice el éxito.

En pocos lugares se percibe tanto el carácter siniestro del mundo subterráneo y el temor aprensivo que inspira, como en las catacumbas donde reposaban los restos de los primeros cristianos, cada uno en su nicho, como fichas en un archivador. Una inquietud similar se siente en los largos túneles de la mayor fábrica subterránea del mundo, construida en Alemania bajo los montes Harz, donde numerosos prisioneros de las naciones conquistadas trabajaron como esclavos en la fabricación de una nueva y terrible arma, el misil balístico, con el que Alemania intentaba ganar la segunda guerra mundial. Comparados con éstos, los ligeros y animados túneles del CERN (el laboratorio europeo de física de partículas), donde se encuentra el fisionador de átomos más grande del mundo, parecen de lo más inocuo. En este lugar, una inmensa máquina empotrada en la roca estable investiga los principios fundamentales del universo. Partículas tan pequeñas que desafían la imaginación giran y orbitan a velocidades increíbles antes de chocar unas con otras, una imagen que, en cierto modo, concuerda bien con los antiguos mitos que dieron notoriedad al mundo subterráneo.

Maravillas de la ingeniería subterránea

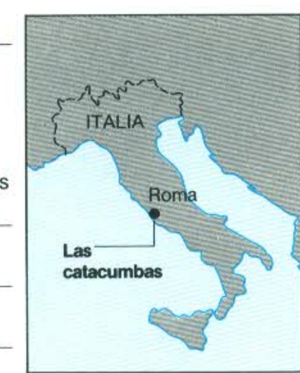
El mausoleo subterráneo

Datos básicos

Los antiguos enterramientos de los primeros cristianos constituyen una de las redes de pasadizos subterráneos más extensas del mundo.

Fecha de construcción:
Siglos II-V.

Número de catacumbas:
42.



A las afueras de Roma existe un laberinto de pasadizos subterráneos donce yacen enterrados los restos de los primeros cristianos. Las catacumbas son un recuerdo de una época en la que ser cristiano constituía una actividad peligrosa. Aquí fueron enterrados varios de los primeros papas y los cristianos martirizados por los emperadores romanos, decididos a erradicar el cristianismo. Junto a ellos yacen muchos otros fieles, hombres y mujeres que compartían la creencia en la necesidad de enterrar a los muertos para poder participar en la resurrección final.

La excavación de las catacumbas, proceso que se prolongó durante varios siglos, fue obra de un colectivo de *fossores* o cavadores. Todavía se pueden apreciar las señales de los picos que utilizaban para excavar los pasadizos en la roca blanda. A mediados del siglo III, cuando la Iglesia sufrió una fuerte persecución, debió incrementarse el número de *fossores,* con el fin de ampliar el laberinto de túneles. Se conocen unos 40 conjuntos diferentes de catacumbas, la mayoría de ellos muy cerca de las principales vías de acceso a la ciudad.

Resulta difícil calcular la longitud total de los túneles, ya que se ramifican y desvían por varios niveles, formando un verdadero laberinto, pero desde luego es considerable.

Los *fossores* que construyeron las catacumbas llevaban una vida triste y lúgubre, recluidos en estrechos túneles sin más compañía que los muertos. No era trabajo para pusilánimes. En ocasiones, se les pedía que excavaran cámaras subterráneas, de 3 metros o más de lado, que servían como criptas para familias enteras. Es muy probable que algunos de ellos obtuvieran ingresos complementarios robando cualquier objeto de valor que hubiera en las tumbas más antiguas y abandonadas.

Más adelante, cuando Roma fue ocupada por sucesivas oleadas de invasores, la existencia de las catacumbas cayó en el olvido, y nadie las visitó durante cientos de años. El responsable de su redescubrimiento, a principios del siglo XVII, fue un entusiasta llamado Antonio Bosio, que, al parecer, había dedicado la mayor parte de su vida, desde los 20 años de edad, a la búsqueda de las catacumbas. Salía a pie por el centro de Roma y dedicaba días enteros a buscar entradas a las catacumbas. Descubrió unas 30, y publicó sus hallazgos en el libro *Roma Sotterranea* (Roma subterránea). Hasta el siglo XIX no se realizaron estudios arqueológicos rigurosos.

En 1854, cuando el arqueólogo G. B. de Rossi comunicó al papa Pío IX que se habían encontrado las tumbas de varios antiguos papas, el pontífice al principio se negó a creerlo. Pero las inscripciones no dejaban lugar a dudas: aquéllas eran, efectivamente, las sepulturas de cinco papas del siglo III.

¿Por qué se tomaron tanto trabajo los antiguos cristianos para enterrar a sus difuntos? En realidad, las catacumbas no son exclusiva de los cristianos, y existen por todo el Mediterráneo, sobre todo en Malta, Sicilia, Egipto, Túnez y Líbano. Es posible que el hecho de que Cristo fuera sepultado después de la crucifixión, con una piedra tapando la entrada al sepulcro, contribuyera a popularizar la idea entre sus seguidores.

Otra razón fue, sin duda alguna, el peligro de persecución. Durante el reinado del emperador Valeriano, por ejemplo, los cristianos tenían vedada la entrada a los cementerios, y la ley prohibía practicar enterramientos dentro de las murallas de Roma. Para proteger las restos mortales de los mártires cristianos, no los enterraban en fosas comunes, sino en catacumbas donde corrieran menos peligro de ser profanados. Al poco tiempo, estos lugares de enterramiento se convirtieron en centros de peregrinación, y los cristianos normales empezaron a manifestar sus deseos de ser enterrados lo más cerca posible de los restos de los mártires.

Otro posible factor pudo ser la limitación de espacio, que obligó a adoptar un sistema de enterramiento a base de tumbas cada vez más profundas. Por último, hay que tener en cuenta que los cristianos tenían la costumbre de visitar a sus difuntos en el aniversario de su muerte, y celebrar allí la Eucaristía. Para una Iglesia perseguida, resultaba mucho más fácil celebrar estas ceremonias en galerías subterráneas y privadas que en un cementerio más convencional. Sin embargo, no parece probable que se utilizaran las catacumbas como lugares secretos de culto. Las cámaras más espaciosas no tienen capacidad más que para unas 40 personas, y en el siglo III existían en Roma por lo menos 50.000 cristianos practicantes, de manera que las misas subterráneas no parecen buena solución.

El terreno que rodea Roma se presta de maravilla a la excavación de túneles. Está formado por una toba blanda, que se utilizaba como base de una argamasa muy fuerte que los romanos em-





El mausoleo subterráneo

Las catacumbas de san Calixto (derecha) servían de sepultura oficial de los obispos de Roma, y deben su nombre a Calixto, encargado del cementerio por designación del papa Ceferino. El propio Calixto se convirtió en papa después de 18 años de administrar el cementerio. Estas catacumbas presentan cinco niveles y contienen numerosos frescos. En la cripta papal se pueden ver inscripciones en griego de los papas martirizados en los siglos III y IV.



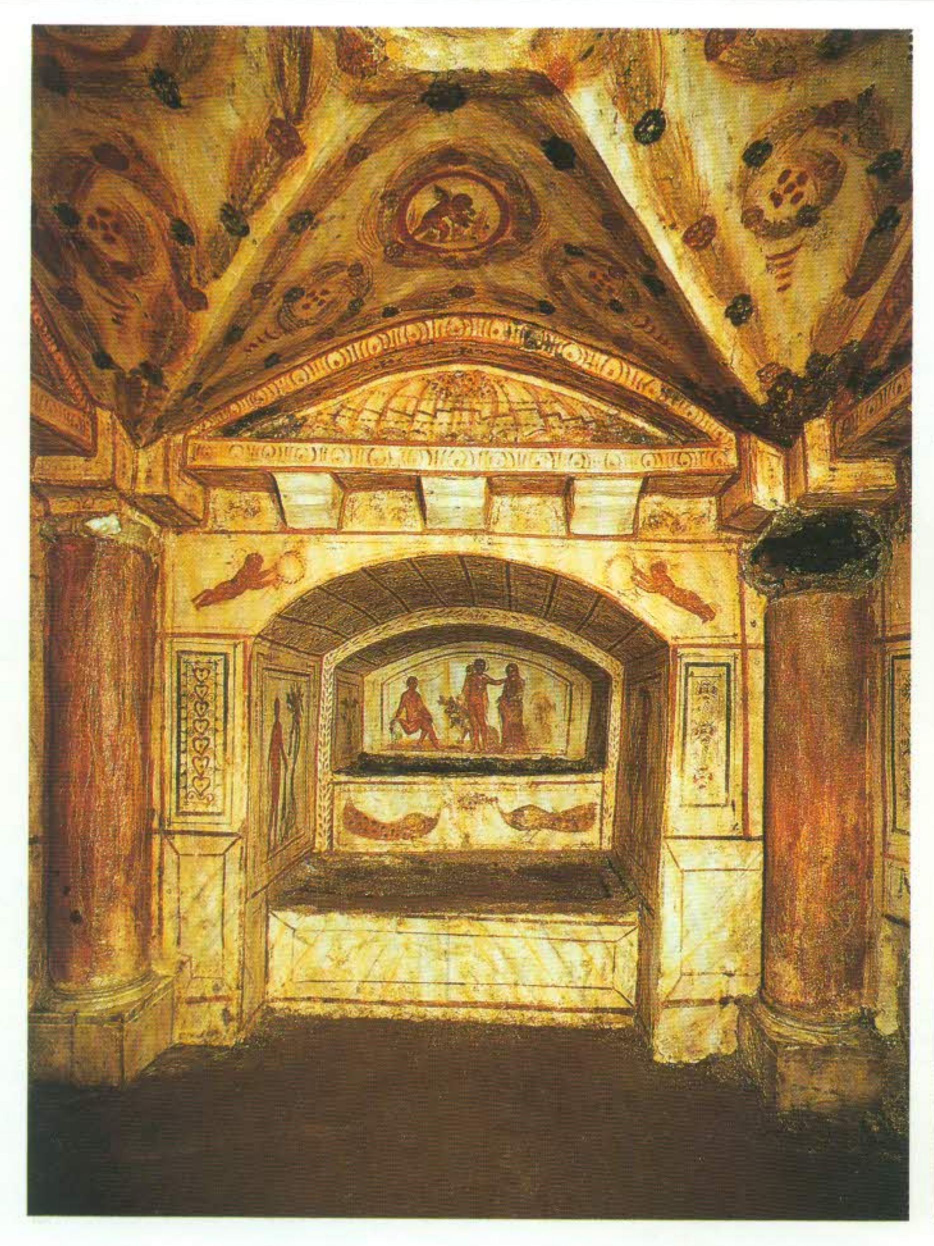


El columbario de la catacumba privada de Vigna Codini (arriba) tiene una sala principal con capacidad para 500 urnas de cenizas. El término «columbarium», que se aplicaba a estos recintos, se debía a su semejanza con los nichos de un palomar («columba» significa «paloma» en latín).

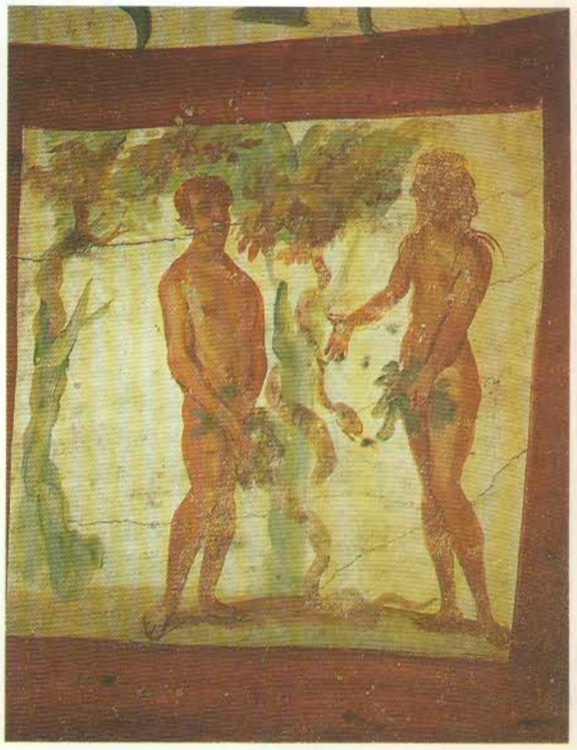
pleaban para construir. Muchas catacumbas comenzaban en los huecos formados en las colinas por los canteros para extraer toba. Se excavaba un pasadizo que penetrara en el suelo y se abrían otros perpendiculares al primero, que luego podían ramificarse a su vez. Algunos pasadizos —de dos a tres metros de altura y aproximadamente un metro de anchura— descienden bajo tierra hasta cinco niveles; para que la luz llegara hasta las galerías se perforaban pozos verticales hasta la superficie. Con cierta frecuencia, las catacumbas vecinas acababan por unirse, creando un verdadero laberinto de pasadizos, en el que resulta fácil perderse.

El tipo más sencillo de sepultura consistía en un nicho en la pared, donde se introducía el cadáver envuelto en dos sudarios de lino. Luego se cerraba el nicho con azulejos. Estas tumbas recibían el nombre de *loculi.* También existen cámaras funerarias, o *cubicula,* donde recibían sepultura familias enteras, el equivalente subterráneo de los panteones familiares de un cementerio normal. A lo largo de los pasillos había lámparas de aceite, fijadas con cemento a las paredes, y tarros de esencias para perfumar el ambiente. Cerca de algunas tumbas hay juguetes o monedas pegados con cemento a la pared. La mayoría de los azulejos han sido arrancados por ladrones de tumbas.

Lo poco que sabemos acerca de los *fossores* que excavaron estas catacumbas se debe a los dibujos descubiertos en las paredes. Vestían túnicas cortas y llevaban una lámpara con una cadena y un clavo incorporados, para poderla colgar de la pared mientras trabajaban. También llevaban un cesto para sacar el material que arrancaban de las paredes con los picos. Resulta evidente que los *fossores* se consideraban mucho más que meros sepultureros, y que gozaban de un estatus casi similar al del clero. Eran, además, artistas, que decoraron las catacumbas con dibujos y pinturas de no demasiado mérito, pero fascinantes por la in-



Esta catacumba (izquierda), situada cerca de la Vía Latina, se descubrió en 1955 durante unas obras de construcción. Se cree que data de los años 320-360, y que pertenecía a unas pocas familias pudientes. Algunos de sus frescos representan escenas que no se habían encontrado en las catacumbas; por ejemplo, temas de la mitología griega, como esta escena, en la que Hércules, tras haber rescatado a Alcestes de los infiernos, se la devuelve a su esposo Admeto.



formación que proporcionan acerca de la Iglesia primitiva.

Durante la época en que Roma fue atacada por sucesivas oleadas de invasores, se sacaron de las catacumbas los restos de muchos mártires, para instalarlos en iglesias y basílicas. En el año 609, por ejemplo, se dice que se trasladaron 28 carros de reliquias a la iglesia de Santa María de los Mártires; y la invasión lombarda de 756 causó graves daños en los cementerios de las afueras de Roma, lo cual decidió al papa Pablo I (757-67) a trasladar aun más reliquias a las iglesias de la ciudad.

Pascual I (817-24) hizo trasladar los restos de 2.300 mártires a la iglesia de San Práxedes. Con esto, las catacumbas quedaron casi vacías y empezaron a caer en el olvido. A partir del siglo IX languidecieron en silencio, visitadas por muy pocas personas, hasta que Bosio las redescubrió en el XVII.

Los hallazgos de Bosio animaron a otros a seguir su camino, aunque muy pocos creían que se tratara realmente de cementerios cristianos. Muchas reliquias y pinturas quedaron destruidas por entusiastas exploradores aficionados.

Las pinturas encontradas en las catacumbas tienen importancia porque son prácticamente las únicas muestras de arte cristiano de la época en que la Iglesia estaba perseguida. Las construcciones religiosas quedaron destruidas, pero la sencilla decoración de las catacumbas ha sobrevivido hasta nuestros días.

Muchas de las pinturas representan escenas del Antiguo Testamento: el pecado original, el arca de Noé, y Abraham sacrificando a Isaac son temas especialmente recurrentes.

También existen numerosas escenas del Nuevo Testamento, como el bautismo de Jesús y muchos de sus milagros. Entre ellos, el más repetido es la resurrección de Lázaro, que aparece más de 50 veces, lo cual resulta comprensible en un lugar dedicado a los difuntos.

Las catacumbas de los santos Pietro y Marcelino (arriba) son las que más decoraciones pictóricas poseen. Abundan las representaciones del pecado original no sólo en los frescos, sino también en los sarcófagos y las urnas de cristal. En las catacumbas de la Vía Latina hay una versión en la que se ve a Adán y Eva expulsados del paraíso por Dios, que aparecía representado sin inhibiciones en el arte cristiano primitivo.

La fábrica bajo la montaña





Datos básicos

La fábrica subterránea más grande del mundo.

Constructor: El Tercer Reich.

Fecha de construcción: 1936-1942.

Longitud de los túneles: 11 kilómetros.

Superficie: 117.900 m².



La noche del 8 de septiembre de 1944, sin previo aviso, una terrible explosión abrió un cráter de seis metros de profundidad en medio de Staveley Road, en el barrio londinense de Brentford and Chiswick. Murieron tres personas: una de ellas era un joven soldado que pasaba por la calle; otra, un niño de tres años. Fueron las primeras víctimas de un misil balístico, el V-2, lanzado desde una plataforma móvil instalada en una calle de La Haya, entonces ocupada por los alemanes. Dieciséis segundos después de la primera explosión, un segundo V-2 caía en Epping, sin provocar heridos.

El V-2 era el arma secreta con la que Hitler confiaba poder ganar la guerra. Lo mismo que la bomba voladora llamada V-1, se fabricaba en una extraordinaria factoría subterránea bajo los montes Harz, en la baja Sajonia. Los túneles de Nordhausen, protegidos por 60 metros de roca y con sus entradas cuidadosamente camufladas contra las inspecciones aéreas, se mantuvieron intactos e invulnerables hasta el final de la guerra, cuando fueron ocupados por tropas de la 1ª División Estadounidense. Para entonces, la fábrica había producido la casi totalidad de los 1.403 misiles V-2 disparados contra Londres, y muchos más que se lanzaron contra objetivos belgas. La de Nordhausen es la fábrica subterránea más grande que jamás se haya construido.

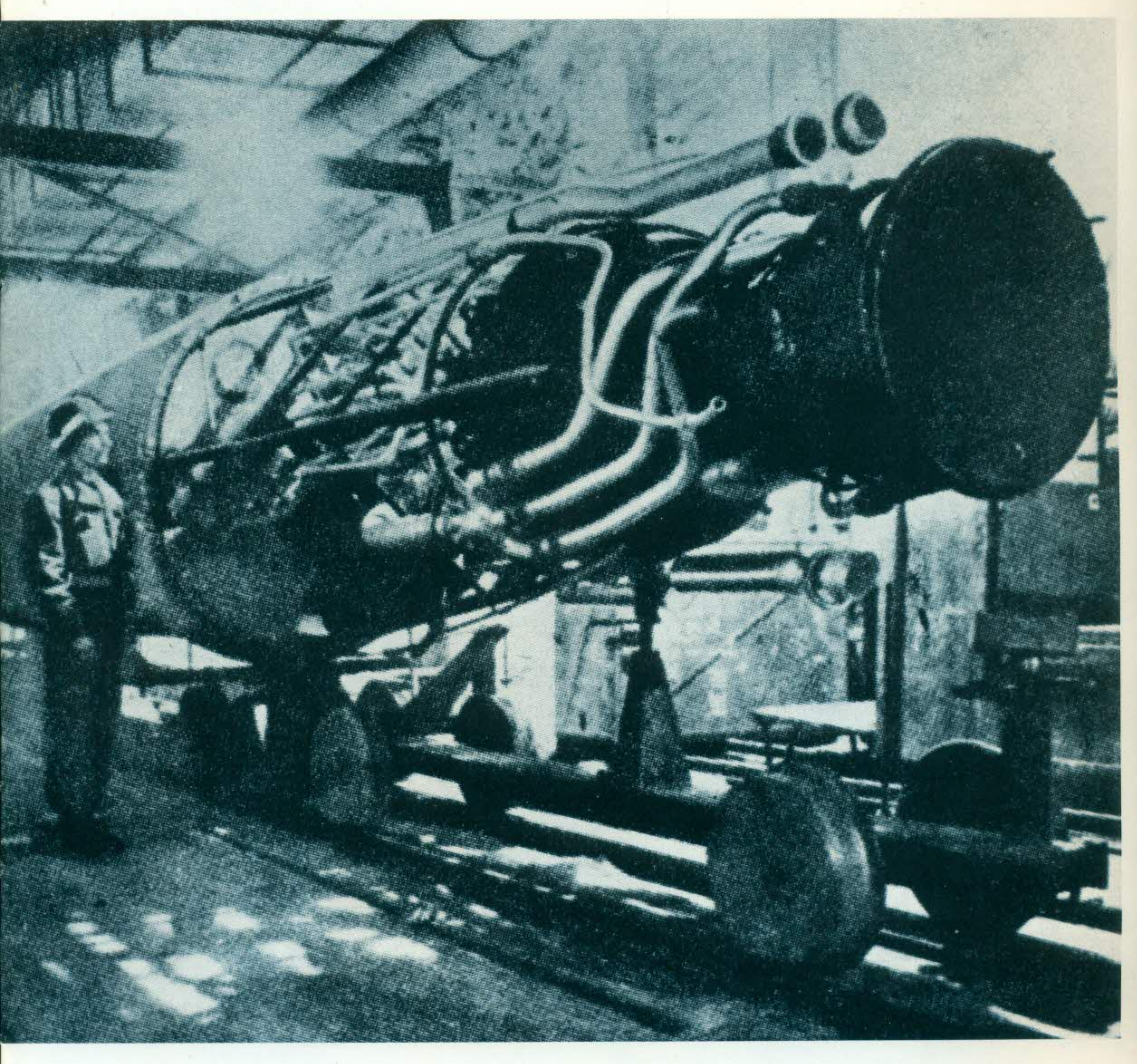
Las obras comenzaron en 1936, formando parte de los preparativos alemanes para la guerra. La firma estatal de almacenamiento de petróleo Wirtchaftliche Forschungs GmbH trazó los planos de un depósito subterráneo bajo el monte Kohnstein, cerca de Nordhausen. La roca era anhidrita (sulfato de calcio), un material ideal para el proyecto, ya que es seco, blando y fácil de excavar y, sin embargo, es lo bastante resistente como para abrir en él largas galerías continuas sin necesidad de soportes adicionales. La roca extraída se utilizó como materia prima para producir cemento, azufre y ácido sulfúrico.

Cuando el complejo quedó terminado en 1942, constaba de dos túneles de servicio, que penetraban en la montaña más o menos paralelos uno a otro, y separados unos 165 metros. Cada túnel medía poco más de 1,6 km de longitud, 10 metros de anchura y 7,5 metros de altura. A intervalos de unos 35 metros, los túneles estaban conectados por 43 galerías transversales, dispuestas como los peldaños de una escalera, cada una de unos 9 metros de anchura y 6,5 de altura. Los once kilómetros de túneles ocupaban una superficie total de 117.900 metros cuadrados. En las galerías transversales se instalaron gigantescos tanques cilíndricos para almacenar combustible, pero en 1943 se desmontaron los tanques por orden del Ministerio de Producción de Guerra, y todo el complejo se reconvirtió para adaptarlo a la producción de armas.

Tras los ataques aliados contra Hamburgo, las fábricas de cojinetes de Schweinfurt y el centro de investigaciones de Peenemünde, donde se inventó el V-2, se necesitaba una fábrica a prueba de bombas, y Nordhausen era el candidato perfecto. La mitad norte del complejo quedó bajo el control de Mittelwerk GmbH, para fabricar y montar las bombas voladoras V-1 (menos las alas) y los cohetes V-2 (menos las cabezas); la parte norte se asignó a la empresa Junkers, para el montaje de los motores de propulsión Jumo 004 para los aviones Messerschmitt 262, y motores de pistón Jumo 213 para los modelos más antiguos, Focke Wulf 190.

Hubo que realizar muy pocas reformas. Se instaló un suministro eléctrico desde una central cercana y se excavó una caverna de 23 metros de altura, donde pudieran ponerse verticales los V-2 ya montados, para probar sus componentes eléctricos. Entre agosto y septiembre de 1943 se trasladaron a Nordhausen numerosos prisioneros de los campos de concentración, para utilizarlos como mano de obra.

Hacia finales de octubre, se trasladó todo el campamento al interior de la montaña, y los prisioneros —en su mayoría franceses, rusos y polacos, aunque también había entre ellos algunos presos políticos alemanes— fueron encerrados en



Un soldado norteamericano, examinando una V-2 casi terminada, después de la toma de Nordhausen por las tropas del general Omar Bradley, el 11 de abril de 1945. Hitler había ordenado destruir toda la fábrica antes de que cayera en manos enemigas, pero quedó casi intacta después de la evacuación de los especialistas y obreros.

tres cámaras oscuras, húmedas y llenas de polvo. Dormían en bancos apilados de cuatro en cuatro, y trabajaban en turnos de 12 horas. Cuando un turno iniciaba el trabajo, el otro intentaba dormir en los mismos bancos sucios, cubriéndose con las mismas mantas. No existían letrinas —había que apañarse con barriles de carburo vacíos y cortados por la mitad— y había que caminar más de 800 metros para llegar a un grifo de agua.

Albert Speer, ministro alemán de armamentos, visitó la fábrica en diciembre y dejó constancia de sus impresiones en su autobiografía, publicada después de la guerra: «Las condiciones en que vivían estos prisioneros eran verdaderamente bárbaras, y cuando pienso en ellos me invade una profunda sensación de responsabilidad y culpa personal. Después de la inspección, los supervisores me informaron de que las instalaciones sanitarias eran inadecuadas y las enfermedades hacían estragos; los prisioneros estaban recluidos en cavernas húmedas y, como consecuencia, la mortalidad... era extraordinariamente elevada.»

Por órdenes de Speer, se construyó un campo de concentración fuera de la montaña para alojar a los prisioneros, y las condiciones mejoraron. Cada vez se enviaban a la fábrica más prisioneros, hasta que el número de trabajadores esclavos ascendió a unos 20.000. La SS dictó órdenes estric-

La fábrica bajo la montaña

tas, prohibiendo todo contacto privado entre los prisioneros y el personal alemán. Bajo ningún concepto debían filtrarse al mundo exterior noticias de lo que estaba sucediendo en Nordhausen.

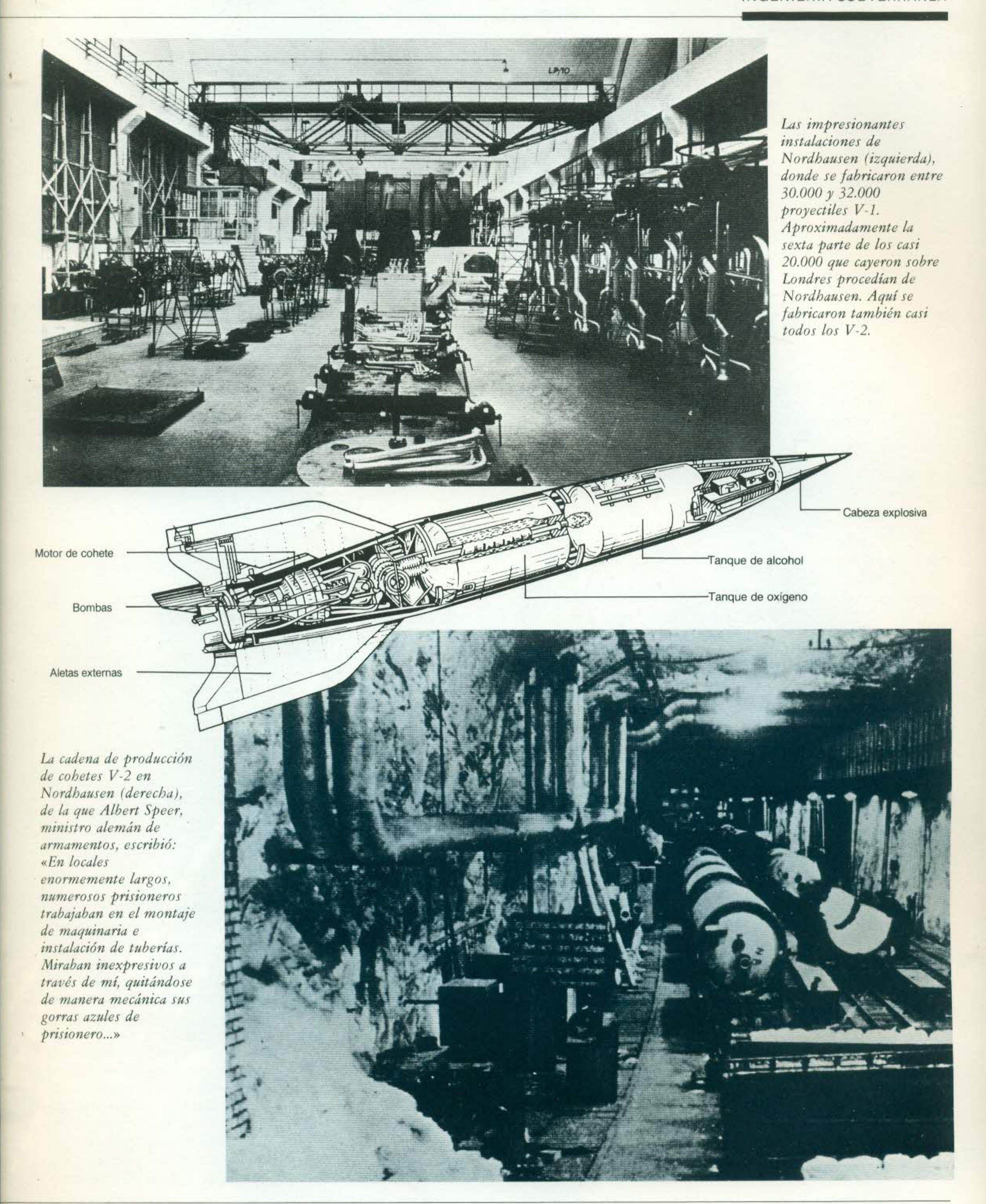
Los tres primeros misiles V-2 salieron de Nordhausen el día de Año Nuevo de 1944; a finales de enero, se habían terminado otros 17. A partir de entonces, la producción progresó con rapidez, y en junio se entregaron 250 misiles. La producción de V-1 comenzó más tarde, en julio de 1944, pero aquel mismo mes se entregaron 300. El V-2 era un arma muy compleja y sofisticada, mientras que el V-1 era simple y barato, pero los dos resultaron muy eficaces, y en Londres se hicieron muchos chistes macabros acerca de cuál de los dos era más terrorífico: el V-1, que podía oírse venir hasta que el motor se paraba, iniciándose entonces una angustiosa espera hasta que se producía la explosión, o el V-2, que caía sin avisar. Una mujer de Streatham adoptó una postura filosófica ante el V-2, considerándolo como si se tratara de un rayo: «Para cuando te enteras de que ha caído, o estás muerto o sabes que ha fallado.» Pero para el escritor James Lees-Milne, que vivía en Chelsea, no cabía duda de que el V-2 era mucho más aterrador que el V-1, porque no avisaba de su llegada: «Uno acaba por esperarlo en todo momento, y salta como un conejo ante cualquier ruido inesperado, ya se trate del escape de un automóvil o de un simple portazo.»

Todas las entradas y los conductos de ventilación de la fábrica estaban perfectamente camuflados. Los misiles se cargaban en vagones de tren o en camiones dentro de los túneles, y se cubrían bien con lonas. Los trenes salían de los túneles y seguían la red ferroviaria alemana hasta llegar a las bases de lanzamiento, cerca del canal de la Mancha. Gracias a estas precauciones, la fábrica consiguió permanecer oculta a los reconocimientos aéreos, y los aliados no tuvieron idea de su importancia hasta finales del verano de 1944, cuando el interrogatorio de un prisionero alemán reveló su existencia. Por suerte para los esclavos de Nordhausen, el mando aliado rechazó un plan de ataque norteamericano, consistente en arrojar enormes cantidades de napalm sobre los túneles y los conductos de ventilación, para provocar un incendio que acabase con todos los ocupantes del interior.

Durante el mes de diciembre de 1944, la fábrica subterránea produjo un total de 1.500 V-1 y 850 V-2, y el éxito obtenido hizo que se pensara en ampliarla, multiplicando por seis su superficie. Se empezaron a excavar nuevos túneles, para instalar en ellos una fábrica de oxígeno líquido (uno de los combustibles empleados por el V-2), una segunda fábrica de motores de avión, y una refinería para producir petróleo sintético. Pero todo terminó el 11 de abril de 1945 cuando las tropas norteamericanas llegaron a la zona. Permanecieron en ella seis semanas, llevando a cabo una minuciosa inspección de la fábrica y sus productos, antes de dejarla en manos del Ejército Rojo.

De haberse inventado antes, el V-2 habría influido de manera decisiva en el desenlace de la guerra. En total, se lanzaron sobre Londres unos 1.403 misiles, que mataron a 2.754 personas e hirieron a otras 6.532. Durante los últimos meses de la guerra, se lanzaron otros muchos contra objetivos belgas: sólo en Amberes cayeron 1.214. Después de la guerra, sus inventores —entre ellos, Werner von Braun— se trasladaron a Estados Unidos para diseñar nuevos cohetes. El misil balístico, dotado posteriormente de una cabeza nuclear, se convirtió en el arma definitiva del precario equilibrio de terror en el que el mundo ha vivido desde entonces.

La fábrica de Mittelwerk se dedicaba a la producción de componentes y maquinaria para bombas volantes y cohetes, y al montaje de los artefactos. Esta fábrica, situada en Niedersachswerfen, cerca de Nordhausen, tenía dos túneles equidistantes que atravesaban la colina, por cada uno de los cuales discurría un ferrocarril de vía ancha para el suministro de materiales y el embarque de los cohetes.

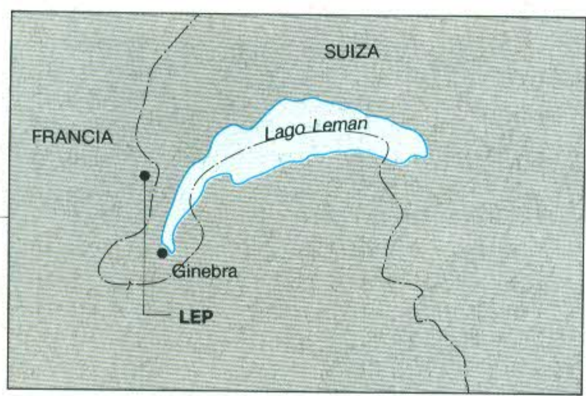


Las impresionantes instalaciones de Nordhausen (izquierda), donde se fabricaron entre 30.000 y 32.000 proyectiles V-1. Aproximadamente la sexta parte de los casi 20.000 que cayeron sobre Londres procedían de Nordhausen. Aquí se fabricaron también casi todos los V-2.

La cadena de producción de cohetes V-2 en Nordhausen (derecha), de la que Albert Speer, ministro alemán de armamentos, escribió: «En locales enormemente largos, numerosos prisioneros trabajaban en el montaje de maquinaria e instalación de tuberías. Miraban inexpresivos a través de mí, quitándose de manera mecánica sus gorras azules de prisionero...»

Un gigantesco túnel de colisión





Datos básicos

El instrumento científico más grande del mundo.

Constructor: Consejo Europeo de Investigación Nuclear (CERN).

Fecha de construcción: 1983-1989.

Longitud del túnel: 27 km.

Coste: 500 millones de libras esterlinas.

Desde los detectores de las salas de experimentación instaladas en los puntos de colisión (derecha) se pueden apreciar las dimensiones de la maquinaria del LEP. Casi todos los aparatos del L3 se encuentran dentro de un imán que contiene 6.500 toneladas de acero, el imán superconductor más grande del mundo. El presupuesto anual, repartido entre 450 físicos pertenecientes a 39 instituciones, ronda los 200 millones de libras.

El instrumento científico más grande del mundo se encuentra en un túnel de 27 kilómetros de longitud, en la frontera entre Francia y Suiza. El acelerador LEP *(large electron-positron)* es una máquina que acelera las partículas subatómicas hasta velocidades próximas a la de la luz, para que choquen entre ellas y observar los resultados. Esto tiene lugar en un campo de circunferencia equivalente a la de la línea Circular del *Metro* de Londres. A lo largo de un túnel de 3,60 metros de diámetro se han dispuesto 4.600 enormes imanes que guían los haces de partículas a través de un tubo en el que se ha hecho el vacío. La máquina está compuesta por más de 60.000 toneladas de equipo técnico, que consumen 70 megavatios de energía eléctrica, tanto como una ciudad de buen tamaño. Y toda esta gigantesca instalación resulta casi invisible desde la superficie.

Los físicos de partículas utilizan esta máquina, la más grande del mundo, para estudiar las partículas más pequeñas, los fragmentos de materia de los que está hecho todo el universo. En otros tiempos se creía que el átomo era la partícula natural más pequeña, pero más adelante los científicos demostraron que los propios átomos están formados por partículas aún más pequeñas: electrones, protones, neutrones y otras variedades. Los átomos no se pueden desmenuzar con un bisturí ni contemplar con un microscopio; sólo la fuerza bruta es capaz de romper los enlaces que los mantienen unidos. Así pues, el proceso de investigación ha consistido en romper los átomos por la fuerza y después arrojar sus partes componentes unas contra otras, con la mayor fuerza posible, y observar los fragmentos que se forman.

Cuanto mayor sea la velocidad relativa de las partículas, más completa será la ruptura cuando choquen. Desde los años treinta, cuando se construyeron los primeros aceleradores de partículas, estos aparatos han ido aumentando de tamaño, al aumentar también la energía y velocidad de las partículas. En un acelerador LEP se aceleran dos tipos diferentes de partículas, en diferentes direcciones, para hacerlas chocar de frente.

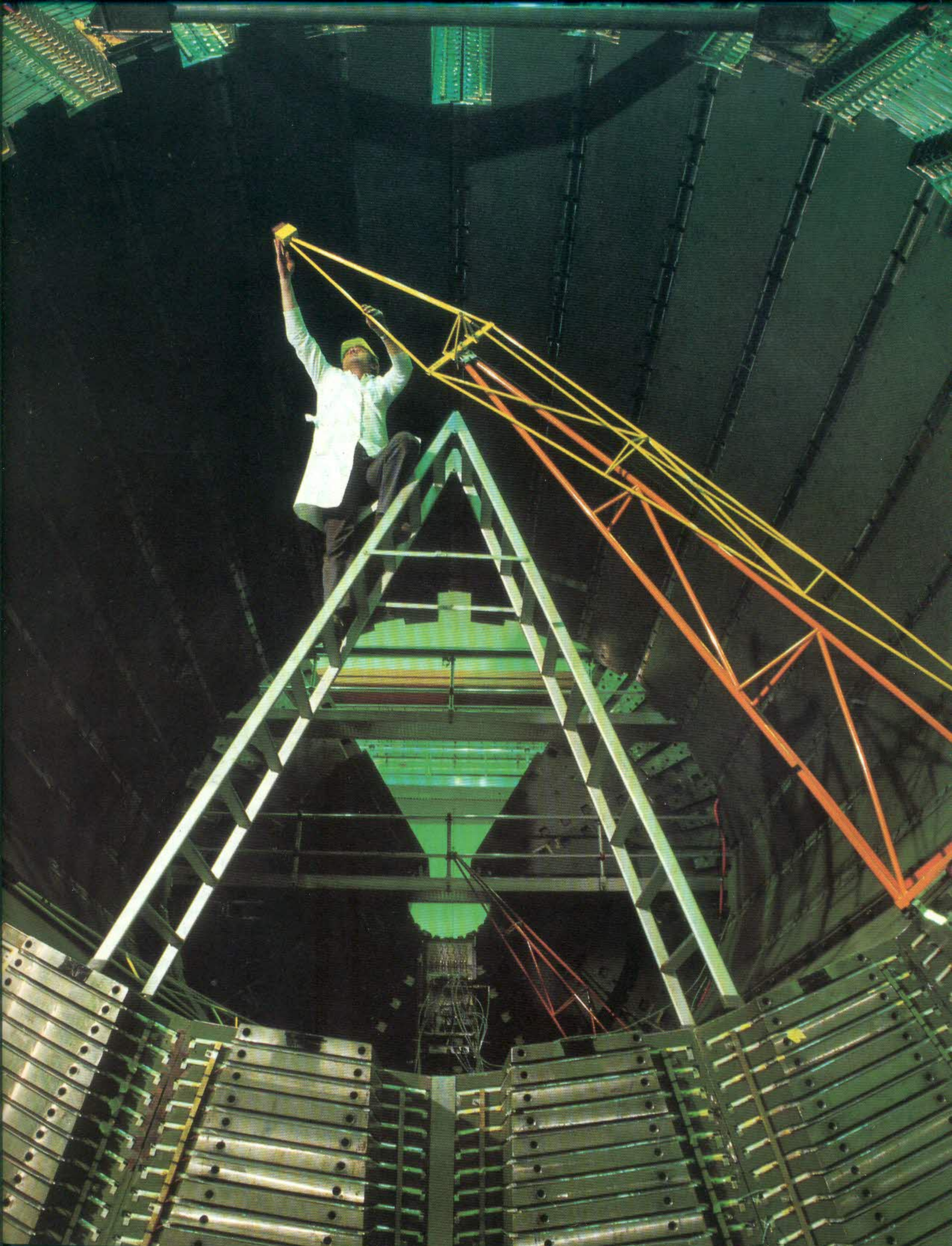
Los electrones, descubiertos por J. J. Thomson, de la Universidad de Manchester, a finales del siglo XIX, son partículas muy ligeras con carga negativa. Los positrones fueron descubiertos en 1932 por Carl Anderson, del Instituto de Tecnología de California, y, como su nombre indica, tienen carga positiva. En realidad, a excepción de su carga, son idénticos a los electrones. El hecho de que ambas clases de partículas posean carga eléctrica permite guiarlas por medio de imanes y aumentar su velocidad mediante campos de radiofrecuencia.

Los haces de electrones y positrones recorren el tubo al vacío del acelerador. Como sus cargas son opuestas, los campos eléctricos y magnéticos los hacen desplazarse en sentido contrario hasta que chocan, aniquilándose mutuamente y generando, durante una fracción de segundo, un estallido de alta energía que reproduce a pequeña escala el estado del universo en el momento de su creación. Al instante, la energía vuelve a rematerializarse en forma de partículas, pero durante esa fracción de segundo los científicos han creado las condiciones que querían estudiar.

Los aceleradores tienen que ser grandes porque si las partículas recorrieran un circuito más pequeño perderían energía y velocidad muy pronto. A mayor energía, mayores aceleradores, lo cual equivale a más caros. Hace mucho que pasaron los tiempos en que una universidad individual —e incluso una nación europea individual— podía costear la construcción de un acelerador competitivo. Por eso, en 1954, doce naciones europeas se aliaron para fundar el CERN (Consejo Europeo de Investigación Nuclear), una empresa conjunta de costes compartidos. Desde entonces, otras dos naciones se han incorporado a la organización, con sede central en Ginebra, que ha cambiado de nombre para pasar a denominarse Laboratorio Europeo de Física de Partículas, aunque en todo el mundo se la sigue conociendo por las siglas CERN.

Los planes de construcción del LEP se iniciaron a finales de los años setenta, cuando los directivos del CERN se dieron cuenta de que para competir con los laboratorios norteamericanos necesitaban una máquina nueva y más grande. Obtuvieron la aprobación en diciembre de 1981, y las obras propiamente dichas comenzaron en septiembre de 1983. Menos de seis años después, en agosto de 1989, el aparato provocó las primeras colisiones de electrones y positrones.

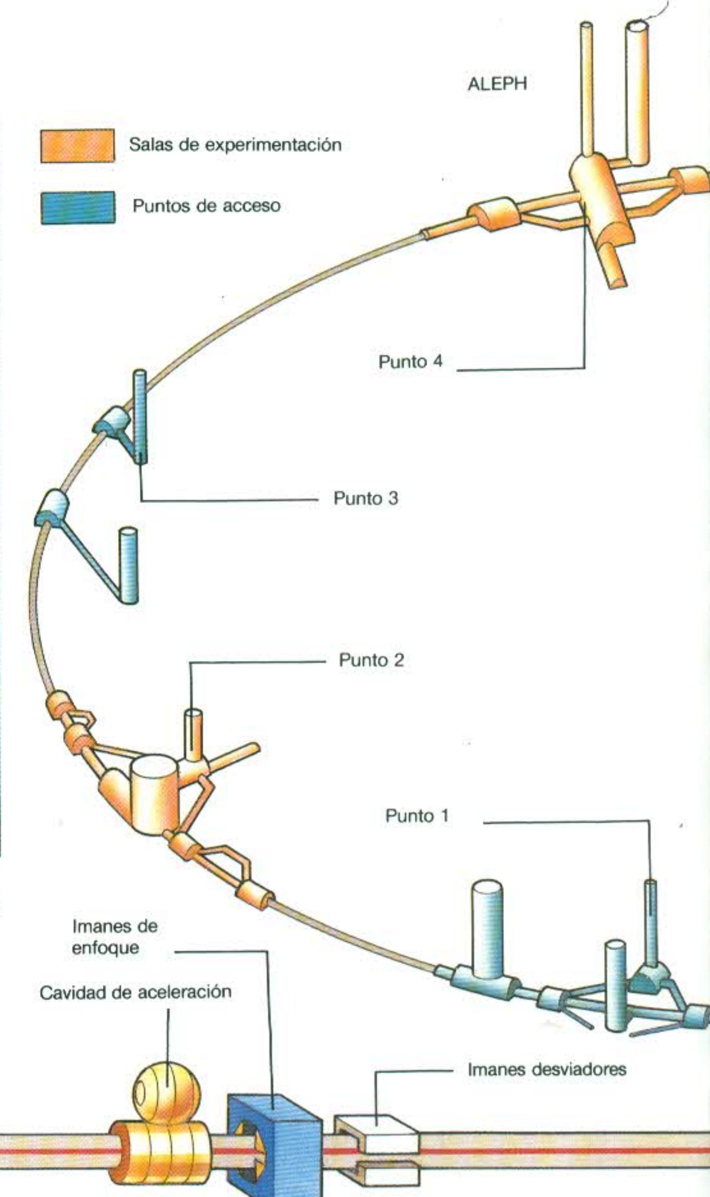
El LEP se construyó bajo tierra por varias razones. La principal fue que así se garantizaba una base sólida y segura para una máquina que, a pesar de sus dimensiones, tiene que funcionar con una precisión extraordinaria. Por otra parte, existen pocos terrenos —sobre todo en las proximidades de Ginebra— lo bastante llanos como para crear en ellos un círculo de más de ocho kilóme-

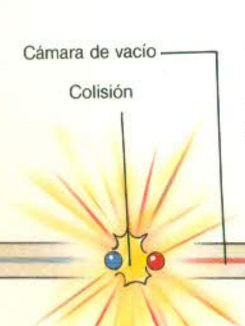


Un gigantesco túnel de colisión



Vista aérea del emplazamiento del LEP (arriba), mostrando el trazado del túnel. La línea de puntos representa la frontera entre Francia y Suiza, con Suiza en primer plano. El círculo pequeño de la izquierda señala el circuito del supersincrotón de protones, uno de los tres aceleradores construidos a partir de 1954, antes del LEP.





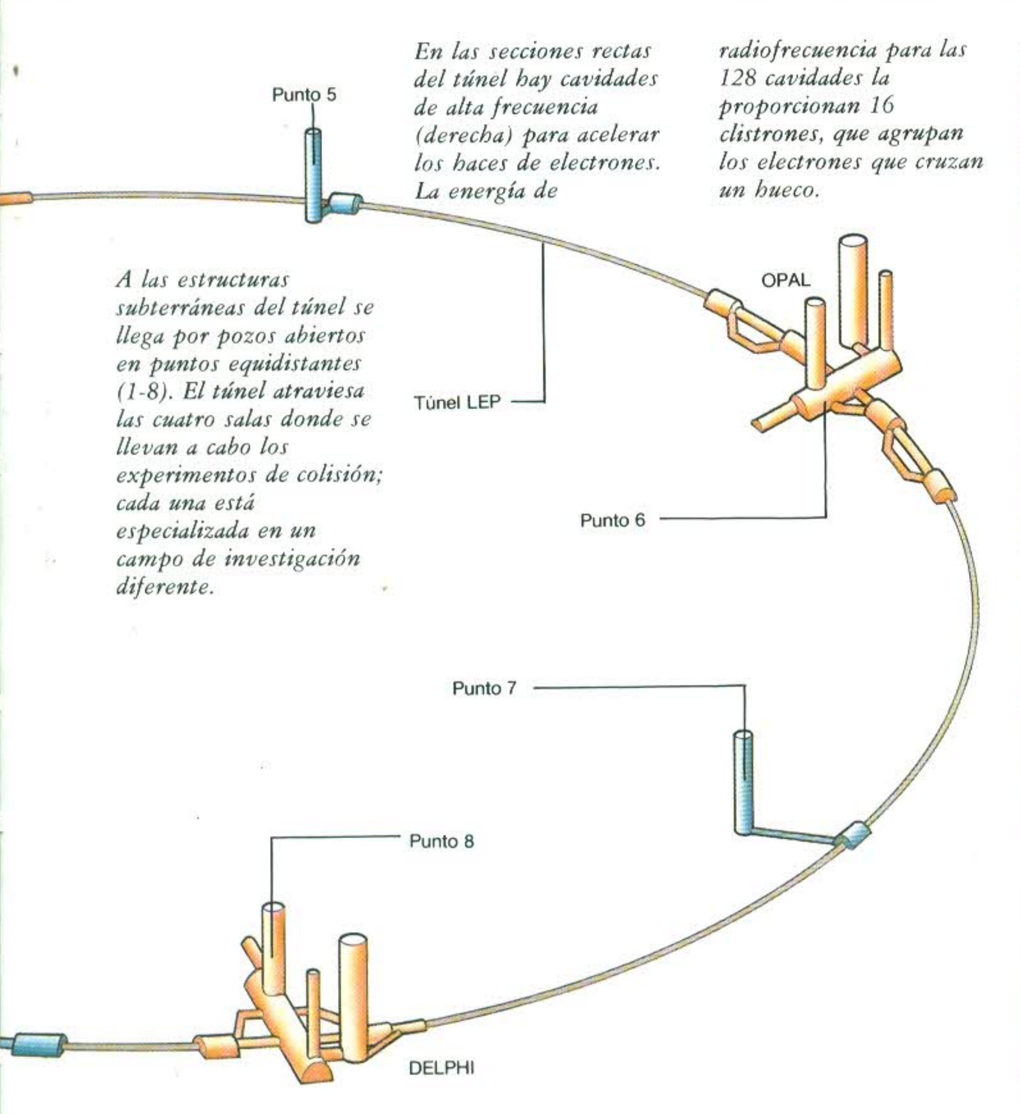
Cada colisión de electrones y positrones proporciona información suficiente para llenar una guía de teléfonos, pero los equipos de detección y las computadoras de alta velocidad son tan avanzados que sólo se registran para análisis los datos insólitos o interesantes. En el interior de la cámara de vacío, los electrones que circulan son acelerados, desviados y enfocados.

tros de diámetro sin tener que realizar grandes excavaciones y levantar terraplenes. Pero además, al quedar la máquina oculta a la vista, al CERN le resultó más fácil obtener el permiso de las autoridades locales.

El emplazamiento del LEP es una pequeña franja de tierra situada entre el lago de Ginebra (Léman) y los montes Jura. El túnel es casi circular, aunque no exactamente, y consta de ocho secciones rectas, de 500 metros de longitud, conectadas por ocho arcos de 2.700 metros cada uno. La mayor parte del túnel se excavó a través de una roca blanda llamada molasa, utilizando perforadoras de sección completa, que se hicieron descender hasta el nivel del túnel mediante 18 pozos que iban desde la superficie hasta profundidades de entre 48 y 145 metros.

Las máquinas perforadoras, guiadas por un rayo láser para no desviarse de su trayectoria exacta, se abrieron camino a través de la molasa, y el túnel que dejaban atrás se iba reforzando con anillos preformados de hormigón. Las excavaciones más grandes corresponden a las salas de experimentación, enormes cavernas subterráneas donde chocan los haces de electrones y positrones, mientras un arsenal de instrumentos registra los resultados. En total, hubo que extraer 1,39 millones de metros cúbicos de material, que se esparció cerca del túnel, sobre tierras de escaso valor agrícola. Por último, se repuso la capa de tierra fértil y se pudo volver a cultivar la tierra.

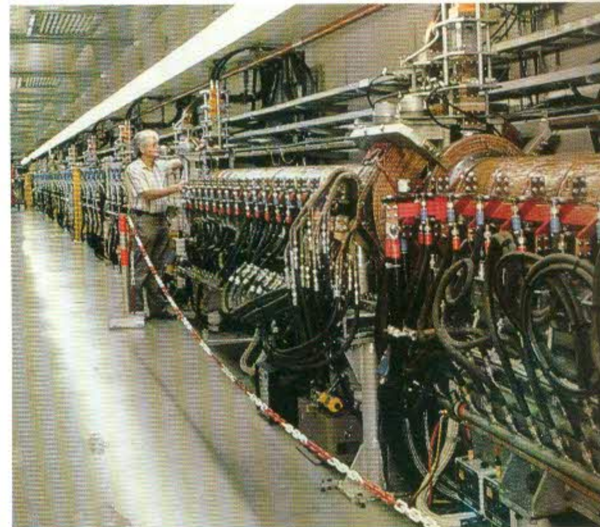
Una vez terminado el túnel, se instaló el tubo por el que circulan las partículas, así como los imanes que permiten guiar su curso. Durante su desplazamiento, las partículas no deben chocar con ninguna otra forma de materia, y por eso es preciso hacer el vacío dentro del tubo. Durante su movimiento, cada electrón y positrón recorre aproximadamente 100 veces la distancia entre la Tierra y el Sol, por lo que el vacío dentro del tubo debe ser absoluto. El haz de partículas circula por el centro de un tubo ovalado, equipado con bom-



En las secciones rectas del túnel hay cavidades de alta frecuencia (derecha) para acelerar los haces de electrones. La energía de radiofrecuencia para las 128 cavidades la proporcionan 16 clistrones, que agrupan los electrones que cruzan un hueco.

A las estructuras subterráneas del túnel se llega por pozos abiertos en puntos equidistantes (1-8). El túnel atraviesa las cuatro salas donde se llevan a cabo los experimentos de colisión; cada una está especializada en un campo de investigación diferente.





bas en toda su longitud para mantener el vacío.

A lo largo del tubo existen 3.368 imanes bipolares que desvían los haces de partículas para guiar su trayectoria, y 816 imanes tetrapolares que enfocan el haz, manteniéndolo fino e intenso. Además, 128 cavidades de aceleración aumentan la velocidad de las partículas. En total, esta maquinaria representa 14.000 toneladas de acero y 1.200 toneladas de aluminio, todo lo cual se transportó hasta su emplazamiento definitivo por medio de un monorraíl. Para instalar los imanes con una exactitud de milésimas de centímetro se utilizaron instrumentos de medición increíblemente precisos.

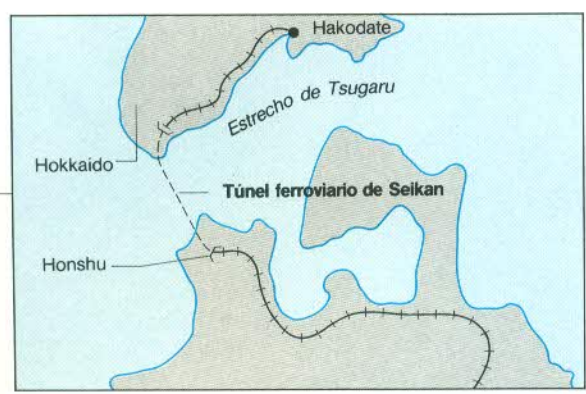
Los detectores empleados para medir los resultados de las colisiones son aparatos espectaculares, de más de 10 metros de longitud y otro tanto de diámetro, montados sobre el tubo por el que circulan las partículas. Existen cuatro de estos detectores, diseñados por equipos científicos muy numerosos. El detector utilizado en el experimento denominado L3 es tan grande como un edificio de cinco pisos y está literalmente abarrotado de instrumentos electrónicos.

El LEP se terminó de construir dentro del plazo previsto, y costó 1.300 millones de francos suizos, superando tan sólo en un 5 por 100 el presupuesto inicial. A las pocas semanas de funcionamiento, había demostrado su utilidad, confirmando que toda la materia está formada por sólo tres familias de partículas subatómicas. Esta demostración de lo que los físicos teóricos denominan el Modelo Estándar justificó de manera triunfal el esfuerzo y el dinero invertidos en la máquina más grande y complicada del mundo, permitiendo avanzar un paso más hacia el Santo Grial de los físicos, la llamada Teoría del Todo, que explicaría todo el funcionamiento del universo, desde la partícula más minúscula hasta los astros más grandes. Cuando lo consigan, los físicos se quedarán sin trabajo, pero esto no parece preocuparles por el momento.

El inyector Linac (arriba) suministra los electrones y positrones, que quedan almacenados hasta el momento de introducirlos en el sincrotón de protones (PS) y el supersincrotón (Super PS), dos aceleradores interconectados que dan el primer empuje energético a las partículas, antes de que éstas pasen al LEP, donde son aceleradas a velocidades aún mayores.

El ferrocarril bajo el mar





Datos básicos

El túnel más largo y más costoso del mundo.

Constructor: Japan Railways (Líneas ferroviarias japonesas).

Fecha de construcción: 1971-1988.

Longitud: 54 km.

Profundidad mínima bajo el mar: 83 m.

El túnel más largo y más caro del mundo se mantiene limpio, seco y apenas sin usar, bajo el estrecho de Tsugaru, entre las islas japonesas de Honshu y Hokkaido. Sólo 15 trenes circulan cada día en cada dirección por este extraordinario túnel de 54 kilómetros de longitud, excavado a través de una roca terriblemente difícil de perforar. Su construcción tardó más del doble de lo previsto y costó casi diez veces más de lo presupuestado, pero representó «un logro tecnológico sin parangón en el mundo», según palabras del ministro japonés de Transportes, que lo inauguró en marzo de 1988. Pero mientras los perforadores trabajaban bajo tierra, los pasajeros japoneses se lanzaron a los aires. Para cuando se puso en marcha el primer tren, los servicios aéreos entre las dos islas estaban ya tan bien establecidos que pocos pasajeros deseaban hacer el viaje en tren.

El túnel representa el cumplimiento parcial de un sueño que viene inspirando a los ingenieros japoneses desde 1936: conectar por tren todas las islas de Japón. En un principio, la línea tendría que haberse prolongado aún más hacia el norte, hasta la isla de Sajalín, y de allí a Corea, que entonces era colonia japonesa. Pero Sajalín cayó en poder de la Unión Soviética después de la segunda guerra mundial, y Corea obtuvo la independencia. Así pues, se adoptó un plan modificado para conectar las cuatro islas del archipiélago japonés, que quedó completo con la construcción del túnel de Seikan y los puentes de Seto, que comunican la isla principal, Honshu, con Hokkaido al norte y Shikoku al sur. La cuarta isla, Kyushu, estaba ya conectada a Honshu mediante el túnel de Kanmon, inaugurado en 1942. Tras la pérdida de cinco transbordadores y 1.430 vidas humanas durante un tifón en el estrecho de Tsugaru, que separa Honshu de Hokkaido y mide 24 kilómetros de anchura en su punto más estrecho, se realizó un estudio sobre las posibilidades de construir un túnel.

El estudio indicó que la tarea resultaría muy difícil. Las rocas de Japón son jóvenes en términos geológicos, se han formado por actividad volcánica y están llenas de fallas y fisuras. Son inestables y porosas a la vez, y permiten grandes filtraciones de agua. Se trata, en definitiva, de la clase de roca más difícil de perforar. Las peligrosas condiciones del mar en el estrecho dificultaron los estudios, y los ingenieros de la Compañía Nacional de Ferrocarriles obtuvieron menos información de la que habían esperado. En marzo de 1964 se empezó a perforar el primer pozo en el lado de Hokkaido; dos años después se comenzaba a abrir un pozo similar en Honshu. Los pozos tenían por objeto facilitar el estudio que permitiera encontrar un método para abrir túneles en la roca y, a largo plazo, servir como entradas al túnel principal.

Los pozos demostraron que resultaba imposible excavar un túnel mientras la roca siguiera siendo tan porosa e inestable. Para que dejara de serlo se utilizó una técnica denominada «lechada». Se perforaron pequeños orificios en la roca, por delante de la excavación, abriéndolos en forma de cono. En estos orificios se bombeó una mezcla de cemento y agente aglutinante a presión, para hacerla penetrar en todas las pequeñas fisuras de la roca. A continuación, se hacía avanzar la excavación a través de esta roca preparada, y después se horadaba y preparaba la sección siguiente. Sin esta cuidadosa preparación, los túneles se habrían inundado nada más abrirlos.

De los 54 kilómetros de túnel, menos de la mitad pasa bajo el mar, pero, inevitablemente, esta sección resultó la más difícil. Para reducir las filtraciones, se excavó el túnel a más de 100 metros por debajo del fondo del mar, pero por cada día de perforación había que dedicar dos o tres días a preparar la roca. Por delante del túnel principal se iba abriendo un túnel piloto, para conocer con anticipación las dificultades que se avecinaban; al mismo tiempo, un taladro iba extrayendo muestras de roca por delante de la perforación.

A pesar de todas estas precauciones, se produjeron por lo menos cuatro inundaciones graves.



El estrecho de Tsugaru está sometido a condiciones meteorológicas extremas y violentas corrientes, que lo mantienen cerrado 80 días al año. En 1954, la pérdida de cinco transbordadores a consecuencia de un tifón dio impulso a las investigaciones sobre la posibilidad de construir un túnel bajo el mar. En primer plano, las obras de construcción en Tappi.



El túnel tiene dos carriles de vía estrecha (105 cm), pero sus dimensiones permitirán instalar vías normales (1,42 cm) para trenes Shinkansen, cuando se disponga de fondos suficientes. El retraso en la introducción de trenes de alta velocidad ha anulado la principal razón de ser del túnel, ya que el tiempo que ahora se ahorra no es suficiente para atraer grandes inversiones hacia estos sistemas alternativos de transporte.

Las peores tuvieron lugar en 1976 y 1977, cuando la penetración de hasta 80 toneladas de agua por minuto obligó a los mineros a desalojar los túneles a toda prisa. En uno de estos incidentes, el de mayo de 1976, quedaron inundados casi cuatro kilómetros del túnel de servicio y más de kilómetro y medio del túnel principal, lo cual retrasó las obras varios meses. Poco a poco, el túnel de servicio consiguió sortear la zona de roca más difícil, y la aplicación de lechadas y otras técnicas especiales de minería permitió hacer avanzar el túnel principal a través de esta zona sin mayores problemas. Aun ahora, con el túnel ya terminado y completamente blindado, se necesitan cuatro sistemas de bombas en continuo funcionamiento para mantenerlo seco. Sin estas bombas, el túnel se llenaría de agua en 78 horas.

El cáracter de la roca impedía utilizar máquinas perforadoras de sección completa, como las empleadas para horadar la caliza bajo el canal de la Mancha. Los ingenieros se vieron obligados a utilizar métodos de minería tradicionales, rompiendo la roca con explosivos antes de extraerla con excavadoras mecánicas.

Dada la longitud del túnel, se precisaban instalaciones especiales para la ventilación y la prevención de incendios. El aire se bombea al interior del túnel desde pozos inclinados, abiertos a cada lado del estrecho; pasa al túnel piloto y desde él penetra en el túnel principal por el centro, para salir por las dos salidas del túnel principal. Una corriente constante de unos 3,2 km/h basta para renovar el aire en el interior del túnel y evitar que se recaliente a causa del calor desprendido por los trenes. En los túneles de servicio, que discurren junto al principal en su tramo submarino, la presión del aire es ligeramente superior, para asegurar que el aire pase del túnel de servicio al principal, y no al revés. Esto tiene una importancia fundamental en caso de incendio, ya que evita que el humo penetre en los túneles de servicio, que constituyen la salida de emergencia de los pasajeros.

En caso de producirse un incendio, el conductor del tren intentaría sacarlo del túnel lo más de prisa posible, pero, dada la longitud del túnel, puede que no lo consiga. Por esta razón se han construido dos estaciones subterráneas de emergencia,

El ferrocarril bajo el mar

donde los pasajeros pueden apearse del tren para huir por los pasillos de emergencia hasta el túnel de servicio. En estas estaciones existen extractores de humos de gran potencia y generadores de emergencia, para garantizar que el túnel permanezca bien iluminado.

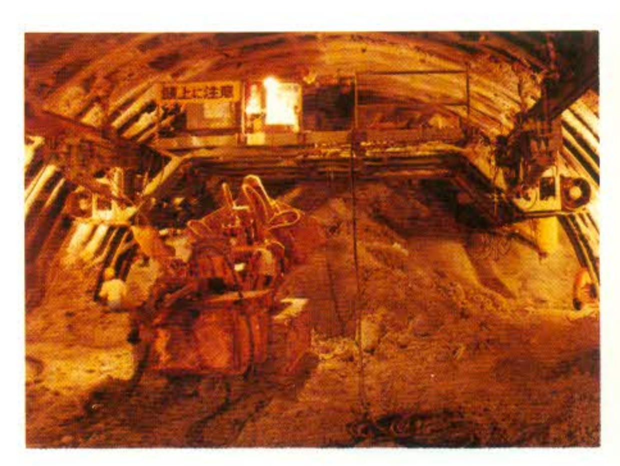
A lo largo del túnel existen cuatro sistemas de detección de calor con rociadores de agua, que permiten detectar al instante cualquier fuego y apagarlo con rapidez. Muchos de estos sistemas se instalaron después de que se produjera un catastrófico incendio en otro túnel ferroviario japonés, que causó 30 muertos y numerosos heridos en noviembre de 1972. «Consideramos que éste es el túnel submarino más seguro que existe», ha declarado Shuzo Kitagawa, subdirector del proyecto.

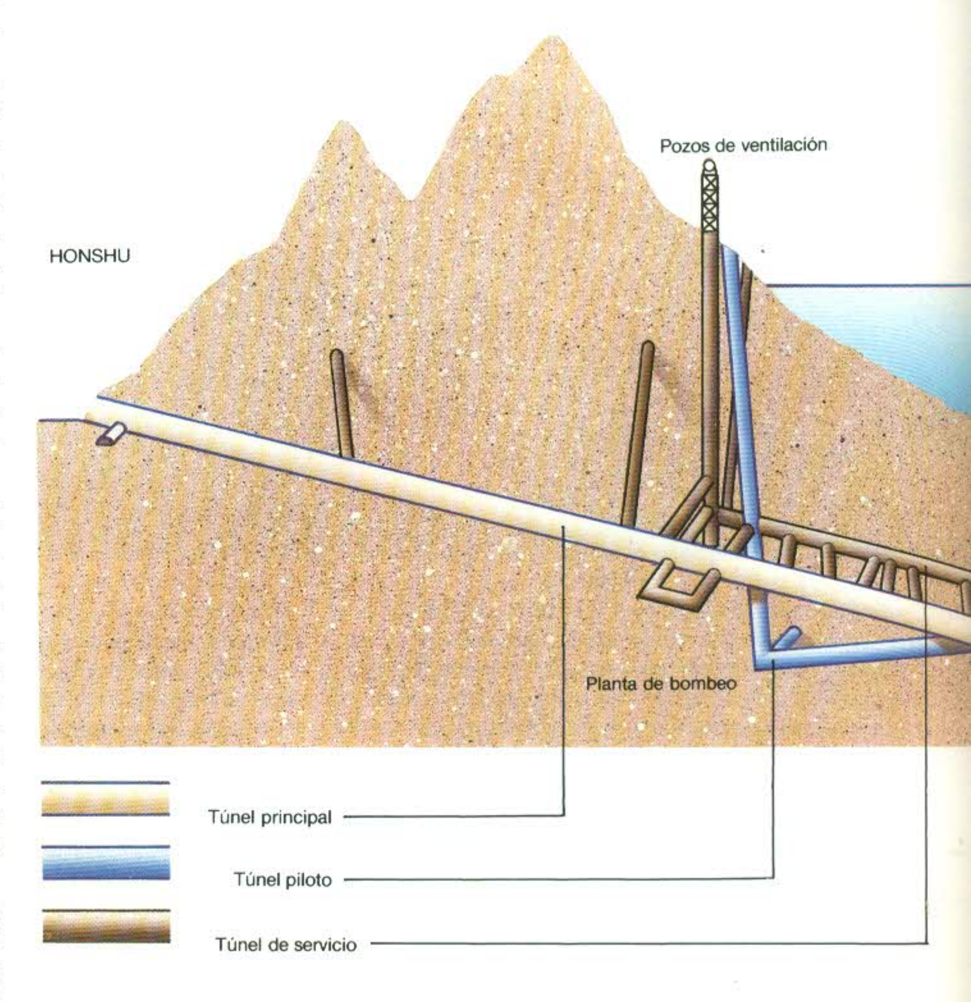
Seguro puede que sea, pero de rentable no tiene nada. El coste total del túnel ascendió a 6.500 millones de dólares, cuando el presupuesto original, elaborado en 1971, lo estimaba en 783 millones. Añadiendo los gastos de financiación y otros gastos secundarios, la cantidad total ascendía a 8.300 millones de dólares. Y mientras los gastos se disparaban, la utilidad potencial iba disminuyendo.

En los diez años transcurridos desde 1975, el número de pasajeros que utilizaban los transbordadores descendió un 50 por 100. En 1986, antes de inaugurarse el túnel, sólo 186.000 pasajeros hacían en tren y transbordador el trayecto de Tokio a Sapporo, la principal ciudad de Hokkaido, mientras que cuatro millones y medio —25 veces más— lo hacían en avión, que sólo tarda 90 minutos. La decisión de no utilizar trenes bala eliminó definitivamente la posibilidad de invertir esta tendencia, y se llegó a hablar de abandonar el túnel y utilizarlo como depósito subterráneo de petróleo, e incluso para cultivar champiñón. Pero eso habría herido de manera inaceptable el orgullo de la compañía japonesa de ferrocarriles, que optó por terminar el túnel y ponerlo en funcionamiento. Se calcula que, durante los próximos 30 años, las deudas y las pérdidas ascenderán a unos 67 millones de dólares al año.

Los trenes diurnos no han podido competir con el tráfico aéreo entre Tokio y Sapporo, pero los nocturnos han tenido más aceptación: cada noche, tres trenes de doce vagones recorren el túnel en cada dirección. Los pasajeros pueden contemplar en cada vagón tableros luminosos que indican la situación del tren en el túnel, la distancia recorrida y la profundidad bajo el mar. La profundidad máxima es de 235 metros. Muchos pasajeros se pasan buena parte del trayecto sacando fotografías de estos tableros y de sí mismos. En mitad del túnel, el tren hace una parada de dos minutos para que los pasajeros puedan fotografiar los indicadores instalados en la pared del túnel.

En algunos tramos se excavó por medios mecánicos (derecha), pero por lo general se emplearon explosivos, estabilizando después la superficie con una mezcla de cemento llamada shotcrete *e instalando vigas de acero de sección en H y una capa de hormigón de 60 cm de espesor, y hasta de 90 cm en tramos inestables.*





Dos clases de pozos conectaban los túneles con la superficie: los pozos verticales se utilizaban para transportar maquinaria, materiales y personal a los túneles principal y de servicio; los pozos inclinados servían como entradas de aire y más adelante se adaptaron para el sistema de ventilación mecánica y como pasadizos para el mantenimiento, salidas de emergencia y operaciones de rescate. El aire del túnel salía por el pozo vertical, que ahora serviría como salida de humos en caso de producirse un incendio en el túnel.



Durante la construcción del túnel principal, se utilizó un ferrocarril de vía estrecha para transportar materiales, maquinaria y equipo a las cabezas de obra, y para extraer tierra y cascotes. Los sistemas de seguridad incluían alarma de incendios, comunicación por radioteléfono y megafonía en los túneles.

Estrecho de Tsugaru

Pozos de ventilación

HOKKAIDO

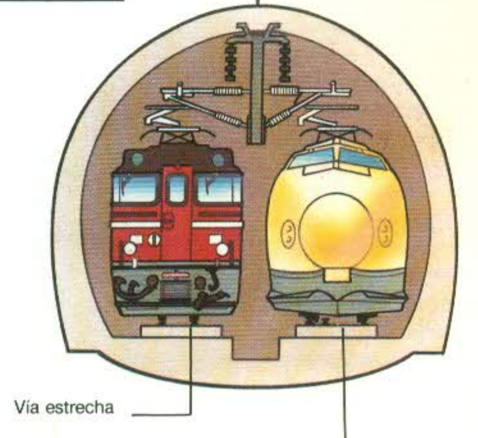
Plantas de bombeo

Pozos inclinados de mantenimiento

Salidas de emergencia

Existen estaciones de emergencia en Tappi y en Yoshioka, que dividen el túnel en secciones controlables. Las estaciones disponen de andenes para que se apeen los pasajeros, con salidas de emergencia, sistemas de megafonía y teléfonos, extractores de humos y equipo contra incendios. Un sistema de rayos infrarrojos junto a las vías detecta los incrementos de calor, y también se han instalado detectores de humo. En Hakodate, un centro de control supervisa las condiciones en los túneles y pone en marcha los sistemas de seguridad.
Se siguen perforando ramales de seguridad, provistos de servicios de emergencia.

Por razones de economía, hubo que aplazar el proyecto original de un túnel con dos anchuras de vía, por el que podrían circular trenes Shinkansen a 200 km/h. Sin embargo, se sigue pensando en transformar el túnel cuando la situación financiera lo permita.



Vía estrecha

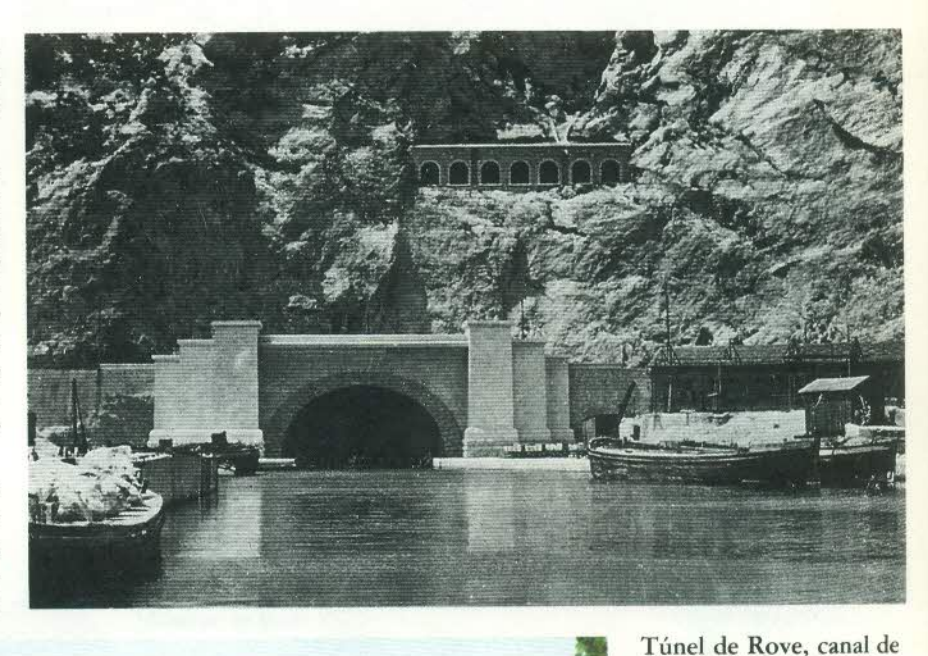
Vía de anchura normal

Grandes túneles

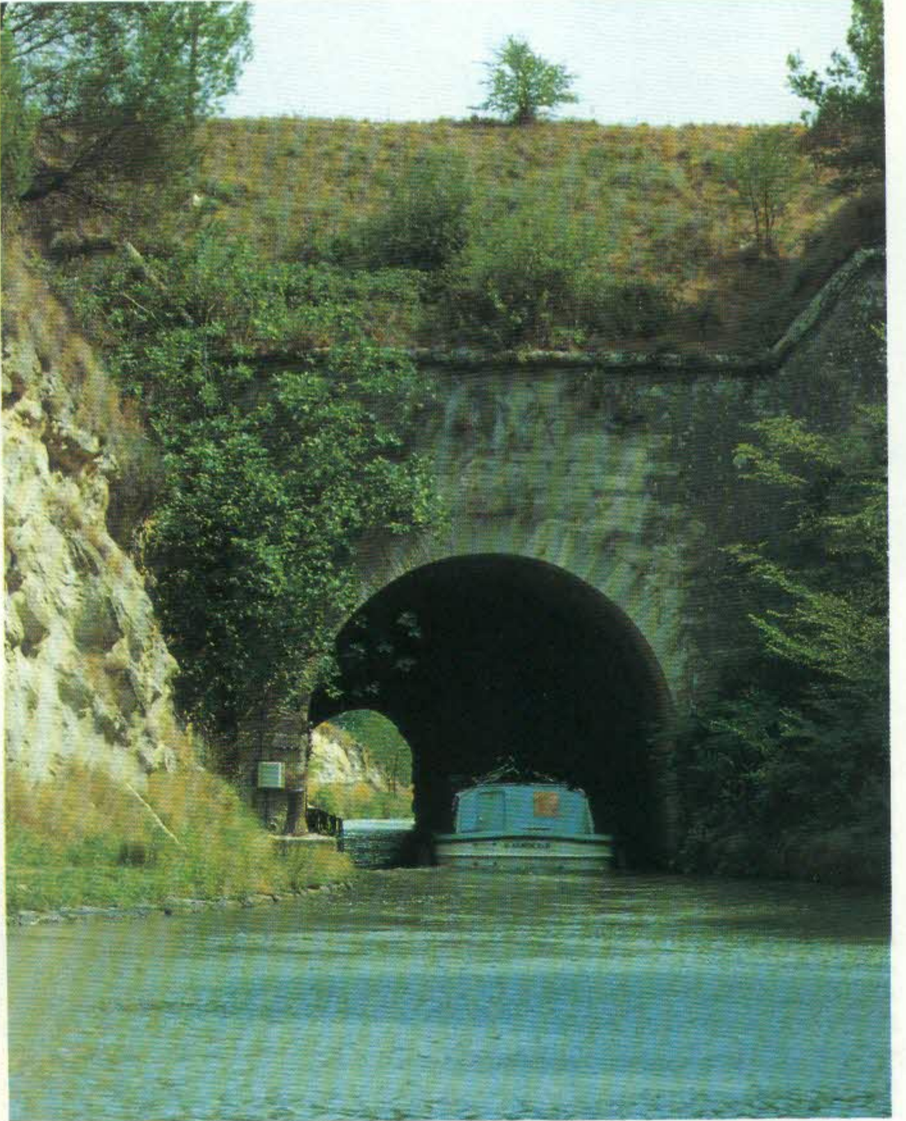
Los primeros túneles se excavaron en las tumbas de los reyes de Egipto y Babilonia. Parece que en el siglo XXII a.C. se construyó un pequeño túnel bajo el río Éufrates.

La extracción de minerales y el socavamiento de las murallas de los castillos sometidos a asedio mantuvieron vivo el arte de excavar túneles hasta que llegó la era de los canales en el siglo XVIII, cuando las obras de ingenieros como James Brindley eclipsaron todo cuanto se había hecho con anterioridad. El ferrocarril trajo consigo la invención del blindaje de túneles y el empleo de aire comprimido, tanto para contrarrestar la presión externa del agua como para hacer funcionar los taladros.

Se han abierto túneles a través de los grandes macizos montañosos situados en rutas importantes. Pero el futuro de la especialidad se encuentra en proyectos como el túnel del canal de la Mancha, que superará en longitud al túnel de Seikan.



Túnel de Rove, canal de Marsella al Ródano
El túnel de canal más largo del mundo, con una longitud de casi siete kilómetros y medio, se inauguró en 1927 y comunica el puerto de Marsella con el Ródano a la altura de Arlés. Se construyó para el paso de buques de navegación marítima, y mide 22 metros de anchura y 11 de altura.
Las obras se iniciaron en el extremo sur del túnel en 1911, y en el extremo norte en 1914. El estallido de la primera guerra mundial interrumpió los trabajos, pero pronto se reanudaron con prisioneros de guerra alemanes. La perforación terminó en 1916, pero las obras de revestimiento duraron bastante más. Dadas las dimensiones de la abertura, hubo que extraer el doble de tierra y roca que en el túnel del Simplón. En 1963 quedó cerrado al tráfico a causa del hundimiento de un tramo del túnel.

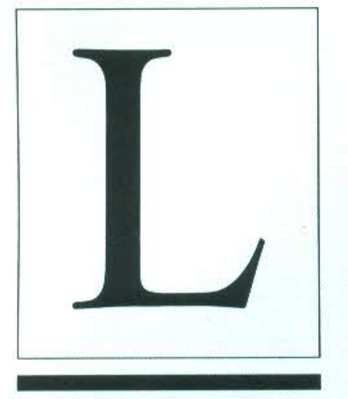


Túnel de Malpas, Canal du Midi
Aunque sólo mide 160 metros, el túnel de Malpas, en el suroeste de Francia, fue pionero en muchos aspectos: terminado en 1681, fue el primer túnel-canal y, en realidad, el primer túnel construido para un medio de transporte; y también fue el primer túnel excavado con ayuda de pólvora, lo cual representó una importante innovación técnica. El canal du Midi, que conecta el océano Atlántico con el mar Mediterráneo, fue el primer gran canal europeo: en sus 238 kilómetros de recorrido hay 119 esclusas, que llevan el canal hasta una altitud máxima de 190 metros sobre el nivel del mar.



El túnel del canal de la Mancha, Folkestone-Sangatte
La idea de construir un túnel bajo el canal de la Mancha tiene casi dos siglos: el primero que la planteó fue un ingeniero de minas francés, en 1802, y durante los 160 años siguientes se presentaron numerosos proyectos, todos ellos rechazados por Gran Bretaña, temerosa de poner en peligro su seguridad nacional. Hacia 1880 se empezaron a excavar túneles pilotos por ambos lados, pero el gobierno británico hizo interrumpir las obras. Las excavaciones se reanudaron en 1973, para volverse a interrumpir por problemas económicos.
En enero de 1986, Eurotunnel obtuvo la concesión para construir una línea ferroviaria subterránea, que constará de dos túneles, con un tercer túnel de servicio entre ellos. Su longitud total será de 49 kilómetros, de los que 37,5 discurrirán bajo el mar. El principal problema para la excavación lo constituye la caliza saturada que hay que perforar. Las perforadoras japonesas disponen de un aislamiento entre la cabeza y el cilindro posterior, para evitar la penetración de agua. El blindaje se atornilla en el mismo cilindro, y la cavidad que queda al avanzar el cilindro se llena de hormigón a presión. El túnel cambiará el panorama del transporte ferroviario británico, y formará parte de la red europea de ferrocarriles de alta velocidad.

Construcciones astronómicas



LOS astrónomos se encuentran en la vanguardia del conocimiento del universo desde que se construyeron los primeros telescopios en el siglo XVII. Aquellos primitivos instrumentos revelaron la existencia en el cielo de muchos más cuerpos que los que podían apreciarse a simple vista, pero por cada objeto que identificaban, otros mil permanecían ocultos. Las limitaciones de los telescopios y la poca claridad de las imágenes que atravesaban la atmósfera terrestre obstaculizaban el progreso del conocimiento.

La solución más obvia para estas dificultades consistía en construir mejores telescopios e instalarlos —como se hizo con los del Observatorio Europeo del Sur— en la cima de altas montañas, donde la atmósfera es más tenue. Isaac Newton mostró el camino a seguir, con telescopios basados en espejos y no en lentes. Desde entonces, los espejos se han ido haciendo cada vez más grandes, para captar cantidades cada vez mayores de luz y poder detectar hasta las estrellas menos brillantes.

Pero la instalación de observatorios más allá de la atmósfera, como el telescopio espacial Hubble, constituye un nuevo y trascendental paso adelante, que permitirá estudiar estrellas individuales que hasta ahora sólo se apreciaban confusamente como parte de un grupo. Por primera vez, el ojo humano podrá contemplar objetos infinitamente lejanos y apenas distin-

guibles. Estos descubrimientos se combinarán con los resultados obtenidos por los radiotelescopios gigantes de alta sensibilidad, que detectan las señales emitidas por objetos misteriosos como los quásares y los púlsares. Entre estos aparatos destaca el Very Large Array («Gran complejo»), un nombre poco expresivo para un extraordinario instrumento construido en una elevada meseta de Nuevo México.

La búsqueda de conocimientos ha impulsado a científicos de todas las disciplinas a construir instrumentos cada vez más grandes y más caros. Pero ningún campo está en condiciones de proporcionar descubrimientos tan espectaculares como la astronomía, que parece estar entrando en su década más productiva desde los años veinte.

Construcciones astronómicas

Telescopio espacial Hubble

Very Large Array

El observatorio europeo del Sur

El observatorio cósmico

Datos básicos

El sistema de recogida de información sobre el universo más potente del mundo.

Agencia coordinadora: Marshall Space Flight Center, Huntsville, EE UU.

Fecha de construcción: 1977-1985.

Longitud: 13 m.

Diámetro: 4,25 m.



Un complicado satélite, del tamaño de un vagón de tren, estuvo cinco años esperando la oportunidad de transformar nuestra imagen del universo, al haberse retrasado su lanzamiento debido al desastre del Challenger en 1986. El telescopio espacial Hubble pasó este período de espera sometido a concienzudas pruebas, y guardado en un recinto escrupulosamente limpio del Centro Espacial Kennedy, en Florida, dentro de una bolsa de plástico en cuyo interior se hacía circular aire fresco. Su puesta en órbita, el 24 de abril de 1990, representó el comienzo de la operación más importante para obtener nueva información acerca del universo, desde que Galileo enfocó hacia los cielos su primer y rudimentario telescopio, hace casi 400 años.

Los astrónomos saben desde hace décadas que desde fuera de la atmósfera podrían obtener una visión del universo mucho más clara que desde la Tierra. El centelleo de las estrellas en el cielo nocturno está provocado por perturbaciones atmosféricas que deforman las ondas de luz que llegan hasta nosotros. Mirar las estrellas desde el suelo es como observar el vuelo de las aves desde el fondo de una piscina. Así pues, el proyecto de instalar un telescopio en el espacio es más antiguo que los propios vuelos espaciales. Ya lo propuso en 1923 Hermann Oberth, pionero alemán que desarrolló muchos de los conceptos fundamentales de la exploración espacial.

En 1962, la Academia Nacional de Ciencias de los EE UU recomendó la construcción de un gran telescopio espacial, y en 1965 y 1969 otros organismos similares se adhirieron a la propuesta. La puesta en órbita de satélites de observación del espacio en 1968 y 1972 acrecentó el interés por el proyecto, pero hasta que no se inventó el transbordador espacial no se dispuso de un medio para poner en órbita un telescopio verdaderamente grande. La Agencia Espacial Europea se incorporó al proyecto en 1975, en 1977 se obtuvieron los fondos necesarios, y en 1985 el telescopio estaba ya listo.

El proyecto del telescopio espacial fue diseñado para proporcionar las imágenes más claras y de mayor alcance que los astrónomos han visto nunca. Flotando por encima de los efectos enmascaradores de la atmósfera, puede observar los cielos utilizando rayos infrarrojos y ultravioletas, además del espectro visible de la luz. Puede captar objetos demasiado lejanos o demasiado imprecisos para verlos desde la Tierra, tan distantes que la luz que emiten tarda miles de millones de años en llegar hasta nosotros. Según lo previsto, este enorme alcance permitiría al telescopio espacial explorar el pasado, contemplar acontecimientos que sucedieron hace 14.000 millones de años, cuando el universo era joven. Podría distinguir objetos con una precisión 25 veces mayor que la que se disfruta desde la Tierra, y explorar el universo captando diez veces más detalles que los advertidos hasta ahora.

Sin embargo, este ambicioso proyecto, debido a un defecto en el espejo principal, se ha visto obligado por el momento a renunciar a sus objetivos cosmológicos más importantes, si bien está realizando una gran labor en el campo astrofísico. Esta situación, en cualquier caso, se considera momentánea, ya que se prepara para febrero de 1994 una reparación en órbita del aparato, a cargo de una tripulación del transbordador de la NASA.

En general, el telescopio espacial es bastante similar a cualquiera de los grandes telescopios instalados en tierra. A diferencia del primitivo





El transbordador espacial forma parte fundamental del proyecto del telescopio espacial: el Discovery puso el telescopio en órbita y un transbordador transportará astronautas para efectuar las reparaciones precisas.

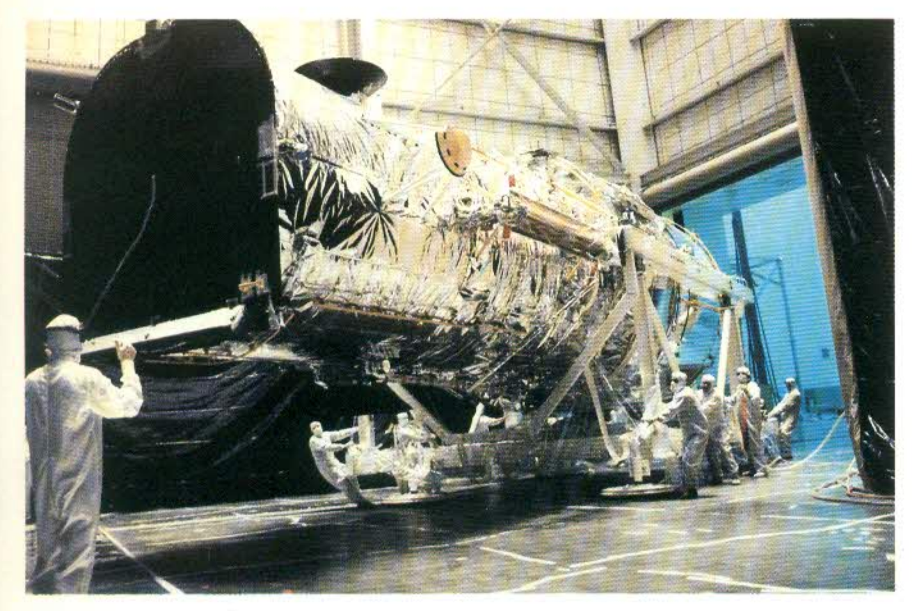


instrumento de Galileo, los telescopios modernos utilizan espejos, en lugar de lentes, para enfocar la luz. Los más grandes tienen espejos de 500 cm de diámetro, para captar el mayor campo posible de luz, y así detectar los objetos más lejanos. El espejo del telescopio espacial mide 240 centímetros de diámetro, y está hecho de un cristal especial, que se dilata y contrae muy poco con los cambios de temperatura. Sus fabricantes, la Perkin-Elmer Corporation, necesitaron 4 millones de horas-personas de trabajo para moldearlo y pulirlo. Su poder de resolución —la capacidad de separar dos objetos distantes— es muy superior a la de cualquier otro telescopio astronómico. Pero, debido a la aberración esférica que sufre, que provoca una pérdida de contraste, la calidad en su capacidad de ver objetos celestes débiles se ha reducido enormemente.

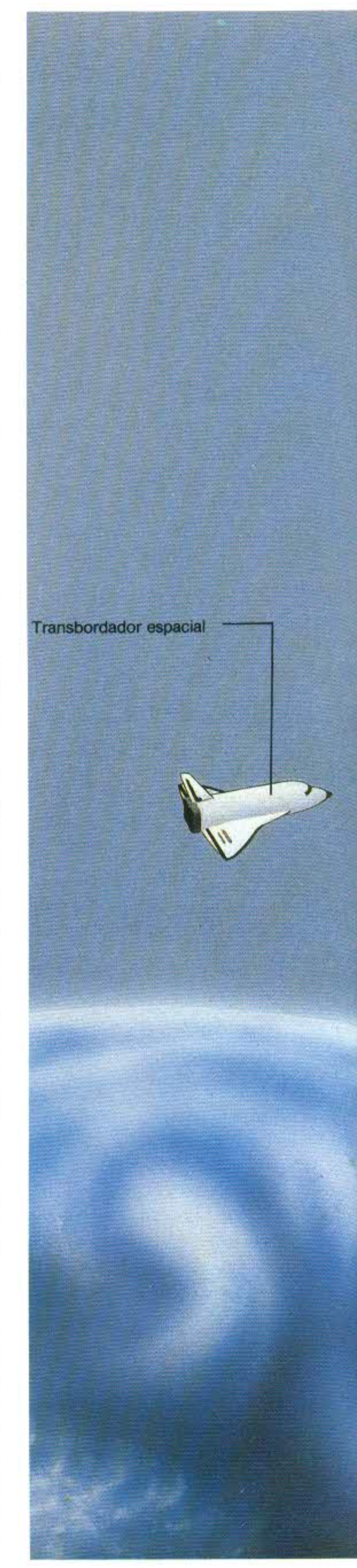
El cristal del espejo está cubierto por una superficie reflectante de aluminio. Este espejo, montado en el interior del cuerpo cilíndrico del telescopio, refleja la luz hacia un segundo espejo, de 30 cm de diámetro y situado a 4,8 metros de distancia, el cual hace regresar la luz, a través de un orificio de 60 cm abierto en el centro del espejo primario, hasta el plano focal, donde están instalados los instrumentos científicos, algunos de cuyos equipos, hoy afectados, habrán de ser sustituidos durante la reparación del Hubble. Ésta consiste básicamente en la instalación del COSTAR, instrumento dotado de diversos espejos que contrarresten el defecto del principal.

El sistema de enfoque del espejo del telescopio fue diseñado de modo tan preciso que pueda dirigir un láser hacia un objeto del tamaño de una moneda situado a 650 kilómetros de distancia, a pesar de estar dando vueltas en torno a la Tierra a una velocidad de 27.000 km/h.

El observatorio cósmico



El telescopio está revestido por varias capas de película metálica brillante, que reflejan la mayor parte de la luz solar y evitan el recalentamiento. La energía eléctrica la generan dos baterías solares, cada una de las cuales contiene 24.000 células solares, más seis baterías complementarias que almacenan la electricidad mientras el satélite permanece oculto del Sol por la masa de la Tierra.



Dichos instrumentos son cinco: dos cámaras, dos espectrógrafos y un fotómetro. La cámara de campo amplio se utiliza para investigar la edad del universo y buscar nuevos sistemas planetarios en torno a las estrellas jóvenes. Esta cámara podrá observar el cometa Halley, que en condiciones normales sólo es visible una vez cada 75 años, cuando su órbita pasa cerca de la Tierra. A pesar del nombre de la cámara, su campo es en realidad bastante limitado, abarcando tan sólo un arco de 2,67 segundos, por lo que sería necesario montar 100 de sus imágenes para obtener una imagen completa de la Luna. Pero este campo reducido proporciona una resolución mucho mejor de los objetos lejanos.

La segunda cámara, llamada cámara de objetos débiles, tiene un campo aún más reducido, cuarenta veces menor que el de la cámara de campo amplio, pero puede extender el alcance del telescopio hasta límites nunca alcanzados, proporcionando imágenes muy nítidas. Muchos objetos que apenas pueden distinguirse desde la Tierra aparecerán como resplandecientes fuentes de luz en las imágenes de esta cámara.

Los dos espectrógrafos se utilizarán para analizar los espectros de luz de los objetos observados. Como los diferentes átomos presentan longitudes de onda diferentes y características, los espectrógrafos permitirán a los astrónomos determinar con exactitud qué elementos forman parte de los objetos brillantes que observen. El espectrógrafo de objetos débiles se utilizará para estudiar las propiedades químicas de los cometas y para comparar la composición de las galaxias más cercanas a la Tierra con la de las más alejadas.

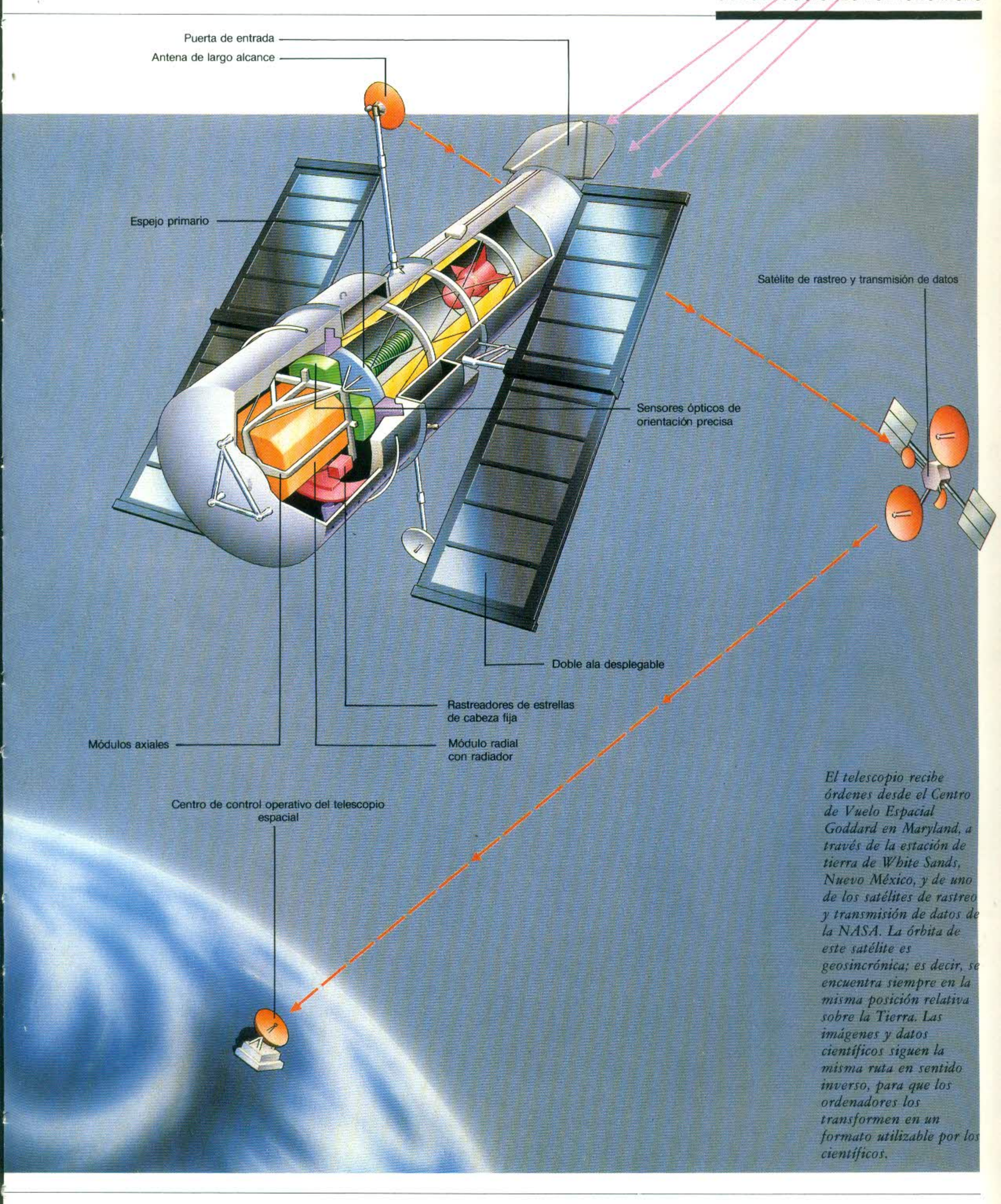
El espectrógrafo de alta resolución se utilizará para estudiar la composición química, temperatura y densidad del gas que llena el espacio entre las estrellas, y para analizar las atmósferas de los planetas de nuestro sistema solar.

El último instrumento es el fotómetro de alta velocidad, que servirá para medir la luminosidad de los cuerpos celestes, investigar la existencia de agujeros negros y elaborar un mapa preciso de la magnitud de las estrellas.

Todo esto se encuentra hoy en un instrumento de 13 metros de longitud y 4,25 de diámetro, que pesa poco más de 11 toneladas. El telescopio está recubierto por varias capas de revestimiento metálico brillante, que refleja casi toda la luz solar y evita el recalentamiento. La lanzadera colocó el telescopio en órbita a 610 kilómetros. Los equipos de control en tierra tuvieron que trabajar varios meses para activar todos los sistemas del telescopio, alinear los espejos y comprobar la exactitud de la órbita. La decepción ante el fracaso fue enorme, pero hoy existen fundadas esperanzas de recuperar casi completamente la capacidad del Hubble, que estaba previsto para 15 años de servicio.

El telescopio está diseñado para poderse reparar en órbita desde el transbordador, que puede llegar hasta él e introducirlo en su recinto de carga, para que un equipo de astronautas con trajes espaciales efectúe las reparaciones necesarias.

El nombre del telescopio espacial rinde homenaje a un célebre astrónomo norteamericano, Edwin Hubble, nacido en 1889, que realizó numerosos e importantes descubrimientos con los grandes telescopios ópticos de su época. Fue él quien demostró que muchos de los objetos que observamos en el cielo no se encuentran en nuestra galaxia, sino que se trata de verdaderas galaxias, situadas a miles de millones de años luz. También demostró que todo el universo se expande.



El telescopio recibe órdenes desde el Centro de Vuelo Espacial Goddard en Maryland, a través de la estación de tierra de White Sands, Nuevo México, y de uno de los satélites de rastreo y transmisión de datos de la NASA. La órbita de este satélite es geosincrónica; es decir, se encuentra siempre en la misma posición relativa sobre la Tierra. Las imágenes y datos científicos siguen la misma ruta en sentido inverso, para que los ordenadores los transformen en un formato utilizable por los científicos.

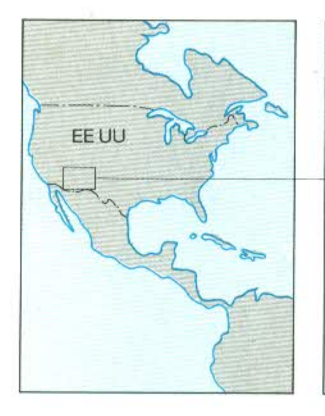
El radiotelescopio definitivo

El radiotelescopio más potente del mundo se encuentra en una llanura elevada de Nuevo México. Desde su aislado y tranquilo emplazamiento, escudriña los cielos, proporcionando radio-imágenes de estrellas, galaxias y otros objetos astronómicos, tan nítidas como las mejores fotografías obtenidas por los telescopios ópticos. Sus detalladas imágenes de algunos de los millones de cuerpos celestes que emiten ondas de radio se utilizan para investigar las colosales fuerzas que actúan en el universo: filamentos curvos a una distancia de un millón de años luz; objetos tan densos que la propia luz es incapaz de escapar de ellos; estrechos canales que surcan el espacio transportando enormes cantidades de energía; y la débil radiación que impregna el cielo, el último y mortecino eco de la Gran Explosión con la que comenzó todo, hace 15.000 millones de años.

La radioastronomía la inventó en los años treinta un ingeniero de los laboratorios telefónicos Bell, llamado Karl Jansky, que intentaba descubrir la causa de los chasquidos y siseos que interferían las transmisiones de radio transatlánticas. Utilizando aparatos rudimentarios, comprobó que dichas señales procedían del centro de la Vía Láctea. Después de la segunda guerra mundial se construyeron instrumentos más sensibles, con el fin de identificar con más precisión las fuentes de emisión de ondas, averiguar si se trataba de objetos visibles y estudiar su estructura íntima. Como estas señales son muy débiles, en comparación con las ondas de radio terrestres, se necesitan enormes antenas en forma de plato para captarlas. La primera de estas «antenas» fue el radiotelescopio de Jodrell Bank, en Cheshire, Inglaterra, que se terminó de construir en 1957 y mide 76 metros de diámetro.

Cuanto mayor sea el plato, mayor será la sensibilidad, y con más precisión podrá identificar los objetos en el espacio. Pero existe un límite técnico al tamaño de los platos, sobre todo teniendo en cuenta que deben orientarse con una precisión exquisita. Muy pronto se comprobó que se podía reproducir el efecto de un plato muy grande combinando las señales de varios pequeños, instalados a cierta distancia unos de otros.

El Very Large Array (VLA) de Nuevo México es, por el momento, la última palabra en este tipo de telescopios. Se trata de uno de los cuatro telescopios controlados por el Observatorio Nacional de Radioastronomía de los EE UU, y consta de 27 platos instalados a los costados de tres raíles rectos, dispuestos en abanico a partir de un punto central. Cada plato mide 25 metros de diámetro, y su superficie parabólica está formada por paneles de aluminio ajustados sobre toda la superficie con una precisión de 5 centésimas de centímetro. La parte móvil de la antena, es decir, el plato, pesa 100 toneladas; el peso de la estructura completa es de 235 toneladas. Cada uno de los 27 platos se puede orientar hacia cualquier lugar del firmamento, con una precisión de 20 segundos de arco, equivalente a 1/180 del diámetro de la Luna.





Dos de los tres raíles tienen una longitud de 21 kilómetros, mientras que el tercero mide sólo unos 19. A lo largo de cada uno hay nueve platos. Los raíles permiten desplazar los platos, con lo que se consigue un efecto similar al del *zoom* de una cámara. Existen cuatro configuraciones posibles para los platos. En la configuración A, están distribuidos a todo lo largo de los raíles, proporcionando así la mayor resolución para captar emisiones pequeñas pero intensas. En la configuración D, están todos agrupados a menos de 600 metros del centro, lo cual permite estudiar fuentes de emisión más grandes y difusas, con menos resolución pero con más sensibilidad. Las configuraciones B y C son disposiciones intermedias.

Para desplazar un plato se utiliza un transportador especial que lo levanta de su pedestal, lo monta sobre el raíl, lo traslada a una posición diferente y lo instala sobre otro pedestal, con una precisión de medio centímetro. Utilizando un par de transportadores, se tarda unas dos semanas en cambiar por completo la configuración del telescopio, y este proceso sigue un ciclo que vuelve a la configuración original cada 15 meses.

Los diseños preliminares del VLA se realizaron a principios de la década de los sesenta, y en 1967 el Observatorio Nacional de Radioastronomía formuló una petición oficial de fondos. El Congreso aprobó la concesión en 1972, y la construcción se inició en 1974, quedando por fin terminada en 1981. Cada plato costó 1.150.000 dólares, y el coste total del radiotelescopio ascendió a 78,6 millones de dólares, rebasando por muy poco el presupuesto inicial.

El emplazamiento elegido, las llanuras de San Agustín, a 2.130 metros de altura y a 80 kilómetros al oeste de Socorro, Nuevo México, resultaba ideal: debido a la altura y al clima desértico, apenas hay nubes que enturbien las imágenes, y las montañas que rodean el lugar evitan las interferencias de la radio, la televisión y las bases milita-

Datos básicos

El radiotelescopio más potente del mundo.

Constructor: Observatorio Nacional de Radioastronomía de los EE UU.

Material: Aluminio.

Diámetro de los platos: 25 metros.

Peso de los platos: 100 t.

Las 27 pantallas en forma de plato apuntan al mismo cuerpo celeste, como sucede en otros radiotelescopios de múltiples pantallas. El VLA representa un salto cuantitativo desde el primer telescopio de dos pantallas construido por el Instituto de Tecnología de California cerca de Bishop, California, en 1959. En 1967, un sistema de tres pantallas construido en 1963 en Cambridge, Inglaterra, descubrió los púlsares, fuentes de emisión que producen estallidos de señales cada pocos segundos.



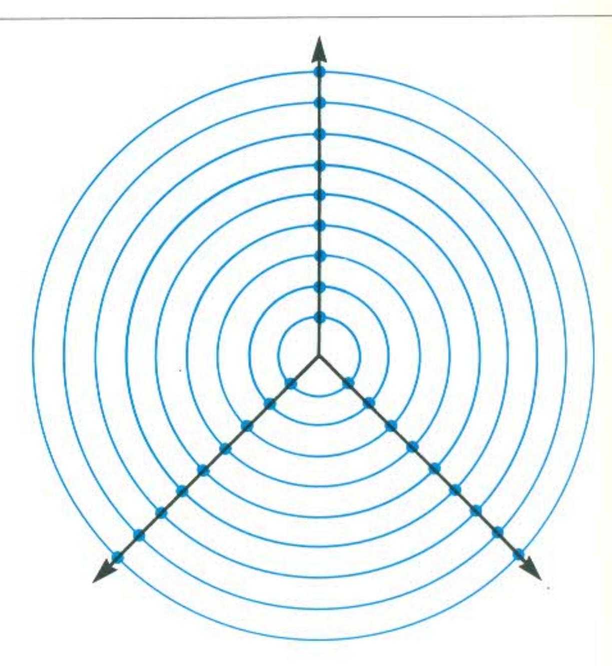
El radiotelescopio definitivo

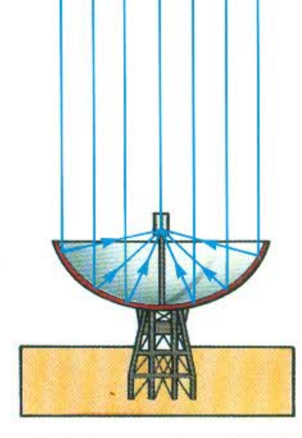
res. El terreno es llano, lo cual facilita el desplazamiento de los platos, y se encuentra lo bastante al sur como para abarcar el 85 por 100 del firmamento.

Las ondas de radio captadas por los 27 platos son amplificadas un millón de veces por los receptores, y pasan a un circuito subterráneo instalado bajo los raíles, que las lleva hasta la sala de control, en el centro del complejo. En esta sala se combinan las señales de los 27 platos para crear la imagen. Como las señales procedentes de los platos más alejados han recorrido más distancia, llegan a la sala de control con un pequeñísimo desfase, de una minúscula fracción de segundo, pero suficiente para destruir la imagen. Para corregir este desfase, se retardan automáticamente las señales de algunos de los platos antes de combinarlas todas en un correlacionador y proceder a su análisis por ordenador.

En primer lugar, el ordenador de calibración analiza los datos en busca de posibles defectos, como las señales procedentes de satélites o instalaciones de radar. Estas señales se suprimen automáticamente, y las señales «limpias» se combinan mediante una técnica matemática denominada transformación de Fourier. El resultado es que las señales se transforman en una imagen, algo parecido a lo que ocurre cuando la luz se transforma en una imagen al atravesar una lente. El ordenador almacena la radioimagen como una secuencia de números en una cuadrícula, en la que cada número representa la intensidad de la señal, y cada punto de la cuadrícula una posición en el firmamento. Cuando se transmiten a una pantalla, los números se traducen en imagen.

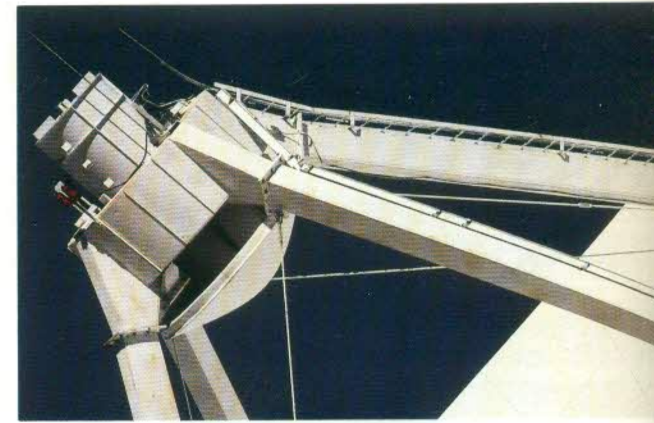
Para obtener una imagen nítida son necesarios más procesamientos. En primer lugar, las señales de radio tienen una gran cantidad de «ruido», que aparece en la pantalla en forma de «nieve». Se puede eliminar reduciendo las señales a su valor



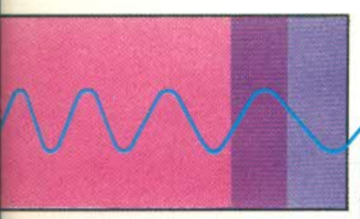


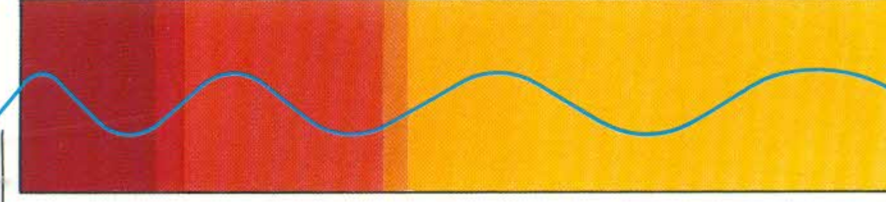
La superficie curva del plato refleja las ondas de radio (izquierda) hacia un segundo subreflector en el foco del plato, del que pasan a los radiorreceptores del centro.

Los 27 platos, dispuestos sobre tres carriles, están conectados electrónicamente para que sinteticen sus señales, equivalentes a las de un único radiotelescopio de 32 kilómetros de diámetro.

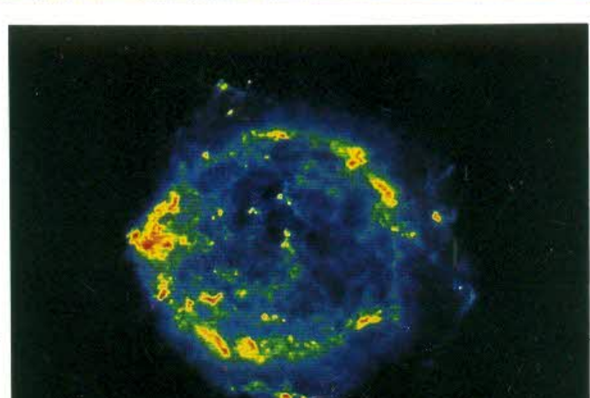


Una ligera rotación del subreflector (arriba), que es un espejo asimétrico, permite dirigir las señales hacia uno de los seis receptores, sintonizados en diferentes longitudes de onda. En la base del plato se encuentran las maquinarias y engranajes azimutales y de altitud, que giran durante la observación para compensar la rotación de la Tierra.

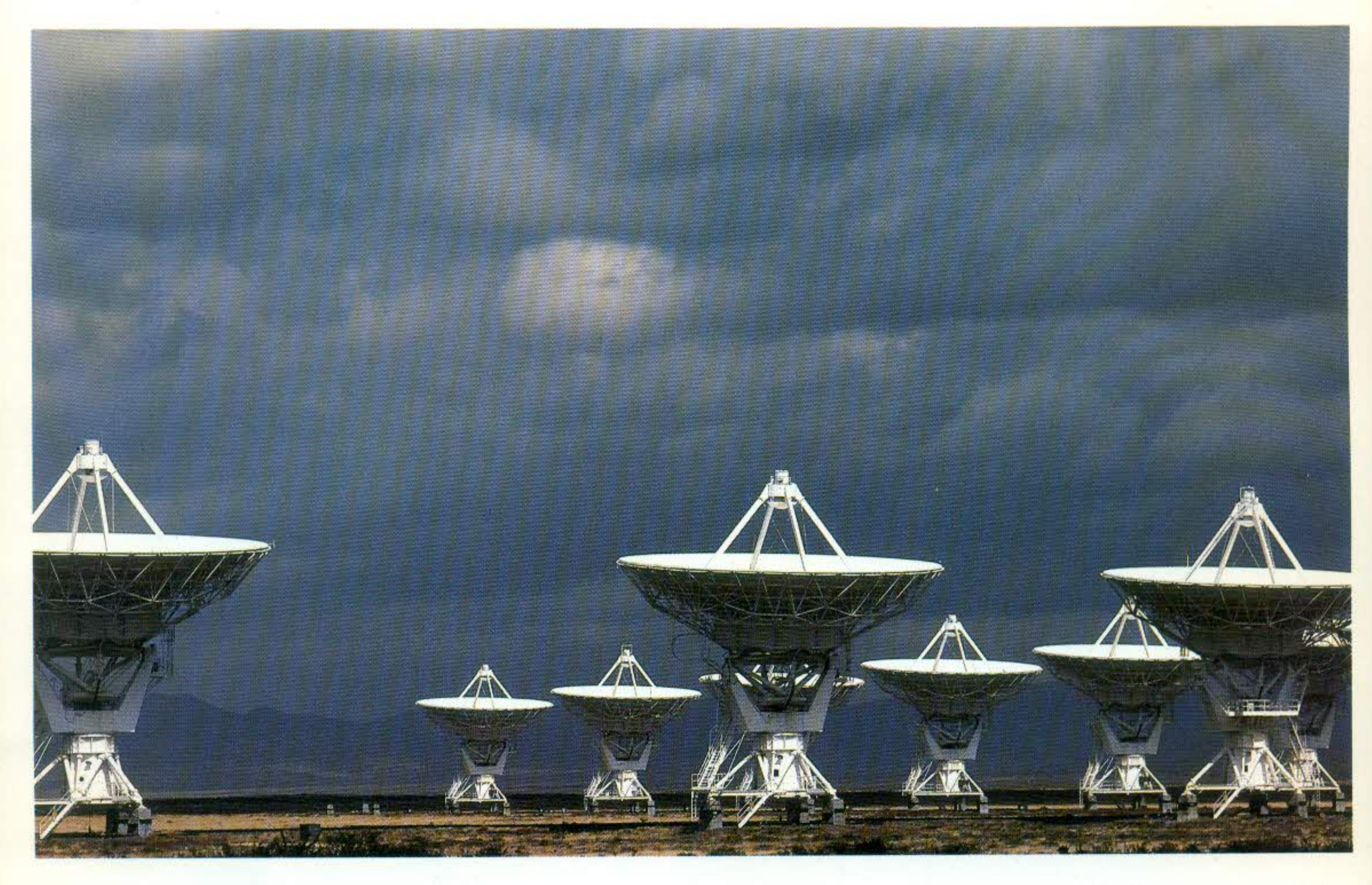




Las ondas electromagnéticas (arriba) varían desde los rayos gamma, en la longitud de onda más corta del espectro (izquierda), hasta las ondas largas, de baja frecuencia (derecha). Cerca del centro, se encuentra el espectro de colores de la luz visible.



Casiopea A (derecha), cuyo cinturón de radioseñales parece una nube esférica de gas en expansión producida por una explosión.



La sincronización de las señales de los 27 platos constituye uno de los procesos más fundamentales del VLA, ya que el tiempo que tardan las señales en llegar desde su fuente de origen al correlacionador no debe diferir en más de una milmillonésima de segundo. La distancia, de varios kilómetros, entre unos platos y otros puede provocar una diferencia de una diezmilésima de segundo.

medio a lo largo de varias horas de observación. Además, existen distorsiones debidas a que los 27 platos sólo cubren una pequeña fracción de la superficie del complejo. Estas distorsiones se pueden corregir, para obtener una imagen igual que la que se obtendría con un solo plato que ocupara toda la extensión del VLA. Por último, hay que contar con el equivalente en ondas de radio del «titileo» de las estrellas, provocado por las condiciones atmosféricas, y que también debe corregirse.

El VLA se mantiene en funcionamiento 24 horas al día, todos los días del año, con excepción de algunas festividades como la Navidad y el Día de Acción de Gracias. Numerosos astrónomos, tanto estadounidenses como de otros países, formulan solicitudes para utilizar el instrumento. Un comité considera las peticiones y les asigna una fecha. Los estudios normales exigen unas ocho horas de observación, aunque para algunos basta con cinco minutos y otros necesitan 100 horas. Los astrónomos llegan un día antes de la fecha asignada, hacen las comprobaciones necesarias y preparan una lista de las fuentes de emisión que desean observar, indicando durante cuánto tiempo y en qué gama de longitudes de onda. Las observaciones se controlan por medio de un ordenador. Una vez recogidos los datos, los astrónomos se marchan con sus cintas magnéticas a sus propios laboratorios, para analizar y, en su momento, publicar los resultados.

Cada año, más de 700 astrónomos utilizan el VLA, cuyas imágenes no tienen nada que ver con los patrones borrosos que producían los primeros radiotelescopios, sino que permiten apreciar objetos inconcebiblemente lejanos, impulsados por fuerzas tan poderosas que desafían a la imaginación. Las radioondas procedentes de Cisne A, una galaxia compuesta por miles de millones de estrellas, han tardado 600 millones de años en llegar hasta nosotros. El análisis del VLA muestra dos nubes, una a cada lado de la galaxia, formadas por electrones atrapados en campos magnéticos.

Aún más espectacular es la emisión de radio de Casiopea A, una gigantesca e hirviente masa de material que se expande a una velocidad de 16 millones de kilómetros por hora, a partir del centro de una supernova gigante que estalló en 1680, aunque, para ser exactos, esa es la fecha en que vimos la explosión desde la Tierra, pero en realidad tuvo lugar 9.000 años antes, que es el tiempo que tardan las señales en llegar hasta nosotros.

Centinela de los cielos



Datos básicos

El observatorio que produce las mejores imágenes del universo.

Constructor: Observatorio Europeo del Sur.

Fecha de construcción: 1964-1991

Altitud: 2.377 m.

Número de telescopios: 15.



En lo alto de una montaña del desierto de Atacama, Chile, 600 kilómetros al norte de Santiago, existe una serie de construcciones tan extrañas como cualquier reliquia de los incas o los aztecas. Repartidos por las laderas hay 15 telescopios, instalados en relucientes edificios plateados con cúpulas blancas. A ellos acuden astrónomos de ocho países europeos, para observar el cielo nocturno lejos de la contaminación atmosférica y de la omnipresente iluminación que cada vez hace más difícil la astronomía óptica en Europa.

Observar los cielos desde la superficie de la Tierra presenta ciertos inconvenientes intrínsecos. La atmósfera, aunque esté limpia, hace borrosas las imágenes obtenidas cuando la luz de las estrellas la atraviesa. El antiguo Observatorio Real construido en 1675 en Greenwich (que en la actualidad es un suburbio de Londres) sufría ya este tipo de problemas en 1850 a causa de su situación.

En la actualidad, a nadie se le ocurriría instalar un telescopio en una ciudad o cerca de ella. Los mejores telescopios británicos se encuentran ahora en una montaña de las islas Canarias; el principal observatorio de los EE UU es el de Kitt Peak, Arizona, situado a unos 2.100 metros sobre el nivel del mar. Y los países miembros del ESO (Observatorio Europeo del Sur) —Bélgica, Dinamarca, Alemania, Francia, Italia, los Países Bajos, Suecia y Suiza— han escogido La Silla, una cresta situada a 2.377 metros de altitud en las soledades del desierto de Atacama.

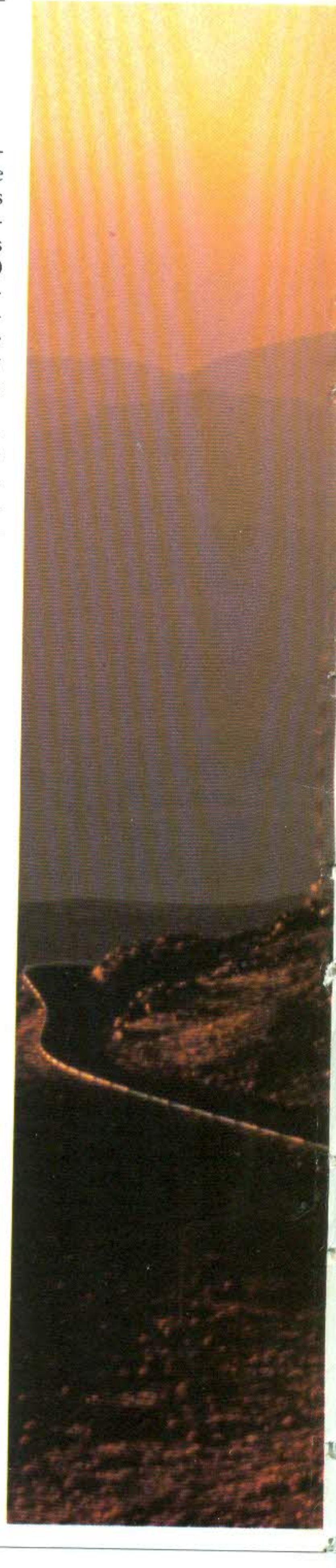
Dada la altitud del emplazamiento, la atmósfera es tenue y la luz de las estrellas no tiene que atravesarla en todo su espesor para llegar a los telescopios, por lo que se obtienen imágenes menos borrosas. La lluvia y las nubes son fenómenos excepcionales en La Silla, que goza de más de 300 noches despejadas al año. Existe muy poca diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas, lo cual constituye otra gran ventaja, porque evita los problemas derivados de la dilatación y contracción de los instrumentos a causa de los cambios de temperatura.

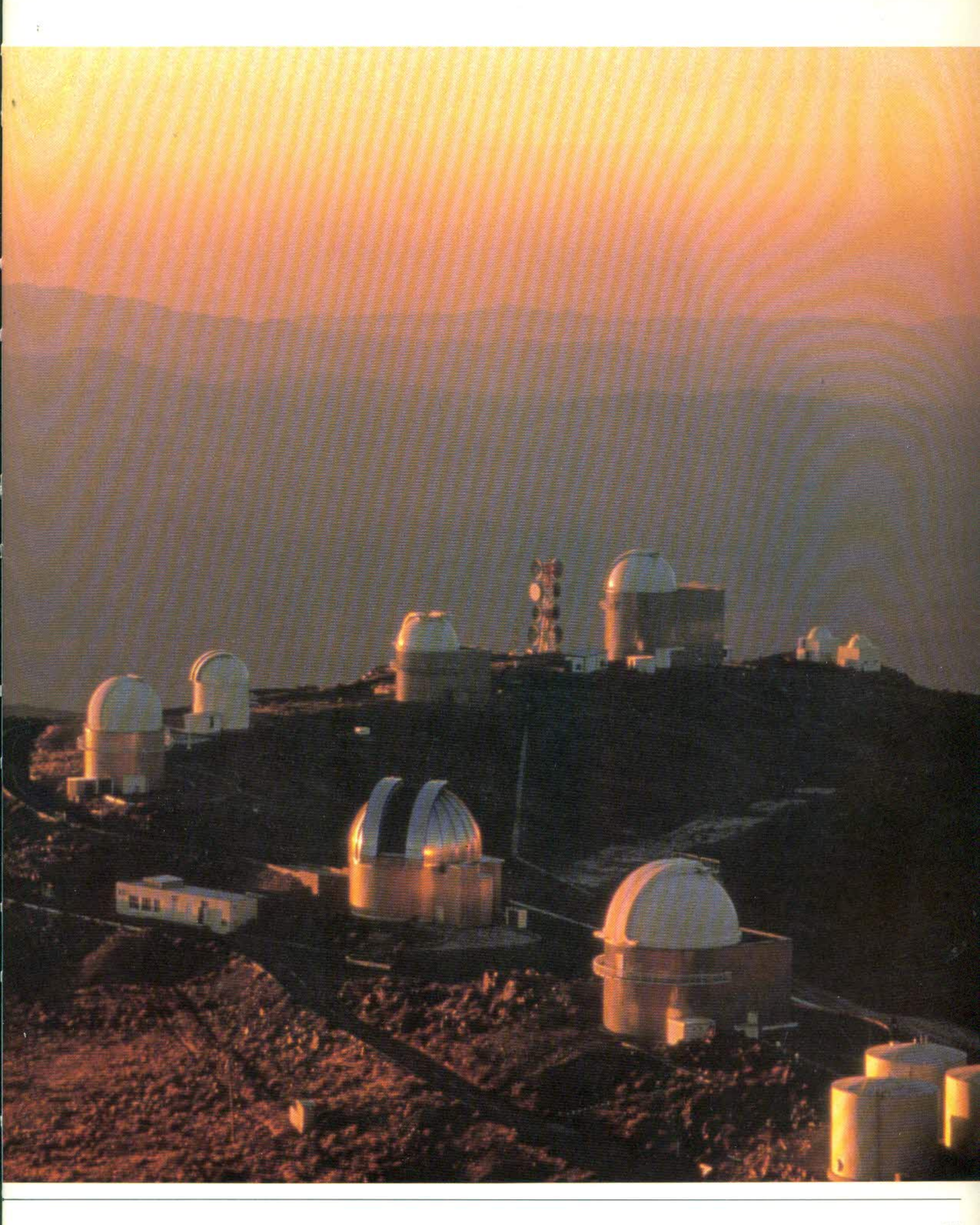
Por otra parte, interesaba instalar un observatorio en el hemisferio sur, porque, hasta tiempos muy recientes, casi todas las observaciones astronómicas de tipo óptico se han llevado a cabo en el norte. El sur proporciona una mejor visión del centro de nuestra galaxia y de las Nubes de Magallanes, dos galaxias vecinas de la nuestra. La combinación de todos estos factores hace de La Silla uno de los mejores observatorios del mundo, donde, según los astrónomos, se obtienen las mejores y más precisas imágenes del universo.

Todos menos uno de los 15 telescopios de La Silla son instrumentos ópticos. Ocho de ellos están financiados por el ESO, y el resto por los países miembros. El único telescopio no óptico es un radiotelescopio denominado SEST (telescopio milimétrico de Suecia y el ESO), con un plato de 14,5 metros de diámetro que viene captando señales de radio de onda muy corta procedentes del espacio desde 1987. La situación del instrumento facilita su cometido, ya que en la atmósfera europea estas longitudes de onda suelen ser absorbidas por el vapor de agua. En La Silla el aire es muy seco, y permite realizar observaciones moleculares en el espacio comprendido entre las estrellas de nuestra galaxia y las de las galaxias vecinas.

El telescopio más interesante de La Silla es, sin duda alguna, el telescopio de nueva tecnología, de 340 cm, que entró en funcionamiento en marzo de 1989. Este instrumento utiliza nuevas técnicas para producir las mejores imágenes de muchos cuerpos celestes, y se trata del más avanzado de los telescopios instalados en tierra.

Todos los grandes telescopios modernos utilizan espejos cóncavos de cristal. La fabricación y pulimentación de piezas de cristal tan grandes, con la precisión necesaria, constituye todo un arte. El cristal del que están hechos se calienta a 1.600° C y después se deja enfriar con suma lentitud —el enfriamiento puede llegar a durar seis meses— para evitar tensiones. A continuación, se puede invertir casi un año en nuevos tratamientos calóricos, y varios años más en pulirlo. Los espejos son muy gruesos y pesadísimos, lo cual provoca distorsiones en la estructura e incluso en la forma del espejo cuando se altera su posición.





Centinela de los cielos



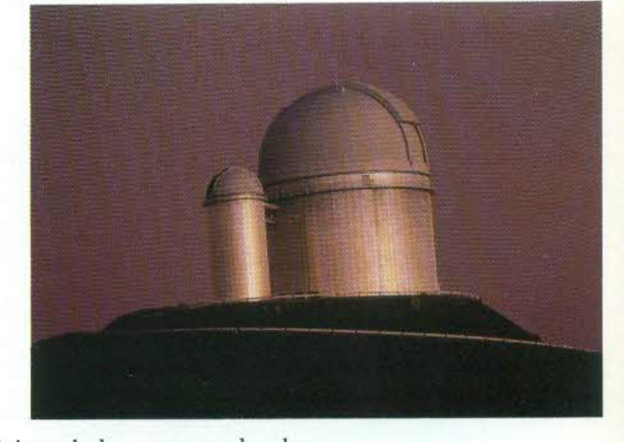
El aire de La Silla es extraordinariamente puro, y el ESO se aseguró de que siga siéndolo, adquiriendo 775 kilómetros cuadrados de terreno en torno a las instalaciones, para impedir que cualquier actividad industrial —por ejemplo, una explotación minera— enturbie la transparencia del aire. No existen en las proximidades ciudades que produzcan resplandor por la noche o generen contaminación atmosférica, los dos principales problemas que sufren los observatorios europeos y norteamericanos.

Un espejo que presenta una forma perfecta en posición horizontal puede no ser tan perfecto cuando se sostiene en posición oblicua.

Los espejos están hechos con vidrio cerámico «Zerodur», de baja expansión, y son sólo la mitad de gruesos que un espejo convencional del mismo tamaño, menos de 25 centímetros de espesor. Esto disminuye su peso de doce toneladas a sólo seis, reduciendo la distorsión de la estructura que lo sostiene.

Bajo cada espejo hay 78 soportes, controlados uno a uno por un ordenador. Cuando se analiza la luz de una estrella, cualquier desviación de la forma ideal, que produce una imagen difusa, genera señales que activan los soportes, alterando la forma del espejo hasta que se obtiene una imagen perfecta. De este modo, el espejo siempre presenta la forma correcta, sea cual sea su posición. Aunque las distorsiones sean muy ligeras, de tan sólo millonésimas de centímetro, corregirlas es importantísimo, porque de este modo se obtienen imágenes de las estrellas y otros objetos por lo menos tres veces más nítidas que las obtenidas por cualquier otro telescopio terrestre de tamaño comparable.

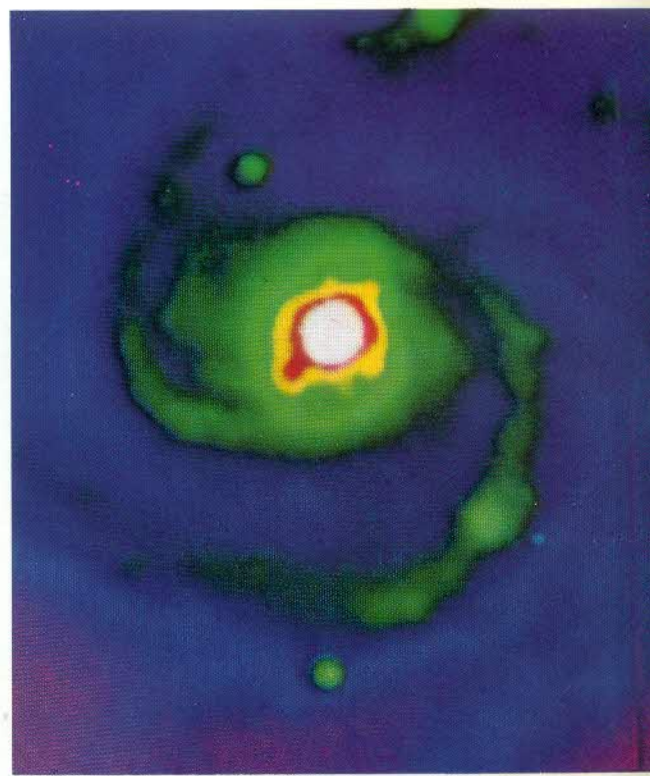
El telescopio de nueva tecnología (NTT) está montado sobre una finísima capa de aceite, de dos milésimas de centímetro de espesor, que le permite girar sobre un eje vertical. La temperatura del aceite está controlada a la décima de grado, para evitar la generación de calor, que perturbaría la atmósfera en torno al instrumento. La construcción en la que está instalado, como todos los observatorios, carece de calefacción para reducir al mínimo las perturbaciones. La precisión de enfoque del telescopio se basa en el empleo de ordenadores que tienen en cuenta la más mínima desviación de la estructura. El resultado es que el telescopio se puede orientar en la dirección precisa con más exactitud que cualquier otro telescopio de las mismas dimensiones.



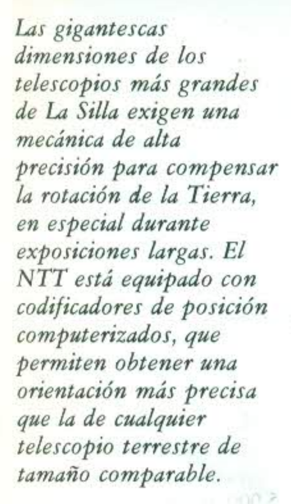
El mayor de los telescopios convencionales de refracción de La Silla es un instrumento de 140 pulgadas (355 cm) construido en 1975, que ocupa la cúpula más grande en el punto más elevado (derecha). Sin embargo, el NTT consigue imágenes de mayor resolución.

Gracias a todo esto, se han podido obtener las mejores imágenes de estrellas y galaxias captadas hasta la fecha. Pero este aparato no representa la última palabra en tecnología de telescopios, ni mucho menos. Por delante de él figuran instrumentos aún más grandes y complicados, con espejos de 10 metros de diámetro o más. Los norteamericanos están construyendo su propio Te-





Esta galaxia espiral demuestra la nitidez de imagen que se consigue con la sofisticada tecnología del observatorio. El NTT es el primer instrumento capaz de resolver agrupaciones globulares a una distancia de 700.000 años-luz, permitiendo estudiar las estrellas individuales. A su vez, esto permite fechar con más precisión las agrupaciones y facilita el estudio de las nubes de gas y polvo.



Las gigantescas dimensiones de los telescopios más grandes de La Silla exigen una mecánica de alta precisión para compensar la rotación de la Tierra, en especial durante exposiciones largas. El NTT está equipado con codificadores de posición computerizados, que permiten obtener una orientación más precisa que la de cualquier telescopio terrestre de tamaño comparable.

lescopio Nacional de Nueva Tecnología, un instrumento de 16,5 metros de diámetro que empezará a funcionar en 1992, y será capaz de identificar objetos del tamaño de una moneda grande a 1.600 kilómetros de distancia.

El siguiente paso del ESO consistirá en desarrollar un sistema de «óptica adaptativa» para corregir las distorsiones de la atmósfera. Esto se conseguirá instalando un pequeño espejo en el telescopio y controlando la imagen que se forma en él de una estrella brillante situada en el campo de visión. A continuación, el espejo se deformará rápida y automáticamente, para corregir los cambios de forma de la estrella provocados por las perturbaciones atmosféricas. De este modo se corregirá también el resto de la imagen, proporcionando una nitidez sin precedentes. Las pruebas realizadas han demostrado que el método funciona, y pronto se incorporará a telescopios como el de nueva tecnología.

El siguiente proyecto del ESO, más a largo plazo, es el telescopio de gran tamaño (*very large telescope* o VLT), que cuenta ya con un presupuesto de 232 millones de dólares. El VLT, que empezará a funcionar en 1998, será más potente que cualquiera de los 20 telescopios más grandes existentes en la actualidad. En realidad, se tratará de una combinación de cuatro telescopios, cada uno de ellos con espejos de más de 8 metros, cuyas señales se combinarán para producir el mismo efecto que con un único espejo de 16 metros de diámetro.

El VLT utilizará la misma tecnología que el telescopio de nueva tecnología, y su sensibilidad le permitirá captar la luz emitida por objetos situados a 18.000 millones de años luz de distancia. El primero de los telescopios se empezó a construir en 1988, aunque todavía no se ha decidido su emplazamiento definitivo, que estará en algún lugar del desierto de Atacama, pero no precisamente en La Silla. Una vez terminado, funcionará por control remoto desde la sede central del ESO, cerca de Munich, sin que sea preciso desplazarse hasta Chile para controlarlo.

Apéndice

MONUMENTOS MONOLÍTICOS

Las Américas

Monumento a Caballo Loco. Custer, Dakota del Sur, EE UU.

Situado a 27 kilómetros del monte Rushmore. Se trata de un homenaje a los indios norteamericanos, tallado en el granito del monte Thunderhead. Este colosal proyecto, que una vez terminado será la estatua más grande del mundo, lo inició en 1947 el escultor Korczak Ziolkowski, que trabajó como ayudante de Gutzon Borglum en el monte Rushmore. El emplazamiento fue elegido en 1940 por el propio Ziolkowski y por el hijo del personaje homenajeado, el jefe Caballo Loco, que derrotó al general Custer en Little Big Horn en 1876, y fue asesinado al año siguiente por un soldado norteamericano, durante una tregua.

La escultura representa a Caballo Loco montado en un poni, y cuando esté terminada medirá 170 metros de altura y 195 de longitud.

Gateway Arch, San Luis, Missouri, EE UU.

Este gigantesco arco catenario, construido en 1966 a orillas del río Mississippi, simboliza la situación de San Luis, como puerta de paso al Oeste. Se trata de un arco de doble pared de acero, diseñado por Eero Sarinen y de 200 metros de altura. La pared exterior es de acero inoxidable, de 6 mm de grosor; la interior, de acero dulce, de casi 1 cm de grosor. El hueco entre ambas está relleno de hormigón por la parte inferior y de material celular por la superior. La sección transversal del arco es un triángulo equilátero hueco, en cuyo interior funcionan ascensores que conducen a una plataforma de observación instalada en lo alto.

Columna de San Jacinto, cerca de Houston, Texas, EE UU.

Esta columna de 173 metros es la más alta del mundo. Se construyó entre 1936 y 1939, a orillas del río San Jacinto, para conmemorar la batalla que tuvo lugar allí en 1836 entre los tejanos mandados por Sam Houston y las tropas mexicanas. La columna es de hormigón, revestido de mármol color crema. Su base es un cuadrado de 14 metros de lado, pero se va adelgazando hasta medir sólo 9 metros de lado en la plataforma de observación. En lo alto de la columna hay una gigantesca estrella que pesa casi 197 toneladas.

Europa

Muralla de Adriano, Cumbria y Northumberland, Inglaterra.

La principal defensa con que contaban los romanos establecidos en Gran Bretaña para resistir las invasiones de los belicosos pictos y escoceses del norte era la muralla construida entre 122 y 130 por orden del emperador Adriano, que va desde el estuario del Solway, al oeste, donde está hecha de tierra, hasta el del Tyne, en el este, donde es ya una estructura de piedra gris de hasta 4 metros de altura. A lo largo de sus 118 kilómetros de longitud había fuertes, castillos y atalayas, atendidos por unos 18.000 soldados.

Por el lado norte, la muralla estaba reforzada por un foso de 8 metros de altura y casi 3 de profundidad. Por el lado sur había un *vallum,* o zanja de fondo llano, de 6 metros de anchura, flanqueada por paredes de tierra de 3 metros de altura, que servía como carretera. Los romanos abandonaron la muralla en 383, cuando Roma fue atacada por los godos, pero aún se conserva una parte considerable, así como 17 fortificaciones, entre ellas el fuerte de Vercovium, cerca de Housesteads, que se mantiene en muy buenas condiciones.

Stonehenge, llanura de Salisbury, Wiltshire, Inglaterra.

La construcción de este monumento megalítico comenzó hacia el año 3500 a.C., antes que las pirámides de Egipto, y se prolongó durante unos 1.500 años. Probablemente, sirvió siempre como lugar de culto, para celebrar rituales religiosos de algún tipo, pero también es posible que se utilizara como observatorio astronómico.

La estructura definitiva, cuyas ruinas podemos contemplar hoy día, constaba de un círculo de monolitos de casi 5 metros de altura y hasta 26 toneladas de peso, conectados por un dintel continuo. Dentro de este círculo había otro formado por piedras de azurita de 4 toneladas de peso, traídas desde las montañas de Preseli, en Gales, a 320 kilómetros de distancia; y en el interior de este segundo círculo, 5 dólmenes dispuestos en forma de herradura y otra herradura de piedras azules. En el centro del conjunto se encontraba la «Piedra del Altar», de arenisca verde-azulada, procedente también de Gales. Los dólmenes están formados por dos piedras verticales y una tercera a modo de dintel sobre las dos primeras, encajadas mediante entrantes y salientes tallados con gran precisión.

MARAVILLAS ARQUITECTÓNICAS

Las Américas

Fábrica Boeing, Everett, Seattle, Washington, EE UU.

La fábrica Boeing, situada a las afueras de Seattle, cuenta con las instalaciones más grandes del mundo. Cuando se terminó, en 1968, tenía una capacidad de 5,6 millones de metros cúbicos (casi dos millones de metros cúbicos más que el edificio de montaje vertical del Centro Espacial Kennedy). En 1980 se amplió la capacidad a 8 millones de metros cúbicos para fabricar el modelo 767. Casi todo el montaje de los aviones Boeing 747 y 767 se lleva a cabo en este gigantesco recinto.

La Casa de la Cascada (Fallingwater), Bear Run, Pennsylvania, EE UU.

Las viviendas diseñadas por el arquitecto norteamericano Frank Lloyd Wright figuran entre las más originales del mundo. La más famosa de todas ellas es, seguramente, la Casa de la Cascada, construida entre 1935 y 1937 para Edgar Kaufmann, propietario de los grandes almacenes Kaufmann, de Pittsburgh. Se trata de la primera casa que Wright construyó con hormigón armado: planchas de hormigón ocre, en voladizos suspendidos sobre una cascada, con planchas de cristal que forman las horizontales entre los planos de hormigón. Es una muestra del concepto «orgánico» de Wright sobre el empleo del hormigón, fundiendo su estructura con las rocas del entorno mediante paredes de piedra sin pulir. La casa presenta ciertas deficiencias técnicas, que han exigido varias reparaciones a fondo.

Hotel Las Vegas Hilton, Nevada, EE UU.

El Las Vegas Hilton, el hotel más grande del mundo, ocupa una extensión de 25,5 hectáreas y dispone de 3.174 habitaciones y suites, 14 restaurantes internacionales, un casino con espléndidas lámparas de araña, una sala de baile de 4.450 metros cuadrados y salas de reuniones con una superficie total de 11.600 metros cuadrados. En su azotea hay cuatro hectáreas de zona recreativa, con una piscina climatizada de 1.325.000 litros, seis pistas de tenis y un campo de golf de 18 agujeros, además de instalaciones para jugar al ping-pong, al badminton y al *shuffleboard.* Veintiún ascensores trasladan a los clientes de un piso a otro, y una plantilla de 3.600 empleados se encarga de atenderlos con el máximo lujo.

Machu Pichu, Perú.

La historia del descubrimiento de la ciudad perdida de los incas, realizado en 1911 por Hiram Bingham en las profundidades de los bosques que cubren parte de los Andes, es una de las más románticas de los anales de la arqueología. Está situada en un emplazamiento único en el mundo, rodeada de montañas y valles de dimensiones colosales y a 2.430 metros sobre el nivel del mar. Las laderas son tan empinadas que fue preciso construir terrazas, no sólo para cultivar alimentos sino también para retardar la erosión del suelo. Cada terraza podía producir alimentos para varios cientos de personas, y el agua llegaba por acueductos que aún seguían funcionando cuando Bingham los descubrió.

Los templos y viviendas que componen la ciudad están construidos con una perfección técnica comparable a la de Cuzco, donde las piedras encajan con tal precisión que resulta imposible introducir la hoja de un cuchillo entre ellas. Se sabe muy poco de la historia de Machu Pichu.

Estadio municipal de Maracaná, Río de Janeiro, Brasil.

El estadio de fútbol más grande del mundo se terminó de construir en 1950, a tiempo para celebrar en él la final de la Copa del Mundo, entre Brasil y Uruguay. Tiene capacidad para 155.000 espectadores sentados y 50.000 más de pie. Los jugadores están separados del público por un foso seco de un metro y medio de profundidad y dos de anchura.

El Pentágono, Condado de Arlington, Virginia, EE UU.

El mayor edificio de oficinas del mundo sirve de cuartel general a las tres ramas de las fuerzas armadas de los Estados Unidos. Se trata de un edificio de cinco plantas, con cinco fachadas de 280 metros de longitud cada una, que ocupa 13,75 hectáreas, incluyendo el jardín, y ofrece una superficie utilizable de 343.000 metros cuadrados con aire acondicionado, donde pueden trabajar hasta 30.000 personas. Está construido de acero y hormigón armado, con algunos revestimientos de piedra caliza, y consta de cinco anillos concéntricos con diez corredores que los conectan, como los radios de una rueda. El complejo dispone, además, de un gran centro comercial subterráneo y un helipuerto.

Europa

La Alhambra, Granada, España.

El exterior austero e imponente de la Alhambra contrasta con su elegante y abigarrada ornamentación interior. La transformación de la antigua fortaleza de la Alcazaba en un palacio —que sirvió durante 250 años como residencia y harén de los gobernantes musulmanes— se inició en 1238. El genio creativo de los árabes alcanzó su cumbre en el siglo XIV, durante el cual se construyó en la Alhambra un verdadero laberinto de salones, columnas, arcadas, patios interiores, estanques y fuentes.

Como el Islam prohíbe el arte figurativo, los arquitectos y artistas realizaron verdaderas maravillas de diseño abstracto en sus azulejos y estucados, tan delicados que parecen de encaje. El ejemplo más perfecto es, tal vez, la asombrosa decoración en forma de «estalactitas» que parecen estallar en la cúpula de la sala de las Dos Hermanas.

Carcasona, Aude, Francia.

El emplazamiento de esta ciudad, en lo alto de una colina aislada y empinada, ha estado ocupado de manera continua desde el siglo V a.C., y todavía pueden contemplarse las torres construidas por los visigodos en 485 d.C. Pero la fama de Carcasona se debe a sus fortificaciones medievales, que son las mejores de Europa. Los vizcondes de Carcasona iniciaron su construcción en el siglo XII, y a partir de 1247 la continuó el rey Luis IX de Francia, que hizo construir las murallas exteriores. Su hijo, Felipe III, añadió nuevas y elaboradas defensas, incluyendo la magnífica torre de Narbona y la torre del Tesoro.

Incluso el irresistible Eduardo, el Príncipe Negro, encontró la fortaleza inexpugnable cuando trató de asaltarla en 1355. Sin embargo, a finales del siglo XVII las murallas quedaron abandonadas y empezaron a deteriorarse; fueron restauradas a mediados del siglo XIX por el gran arquitecto Viollet-le-Duc.

Castell Coch, South Glamorgan, Gales.

Castell Coch, diseñado por William Burges para el tercer marqués de Bute y construido en 1875, puede compararse con las creaciones del rey Luis II de Baviera: los dos hombres tenían un concepto atávico de la arquitectura, y concibieron edificios deliberadamente anacrónicos. Aunque en principio se trataba de restaurar un castillo que estaba en ruinas desde el siglo XVI, Castell Coch es un híbrido que combina la apariencia externa de un castillo galés del siglo XIII con un interior que constituye uno de los más exuberantes productos de la decoración imaginativa victoriana. Por ejemplo, casi toda la superficie del salón de recepciones abovedado está decorada con motivos tomados de la naturaleza y escenas de las fábulas de Esopo y la mitología griega.

No es corriente que un arquitecto coincida tan plenamente con las ideas de su cliente como coincidía Burges con el marqués de Bute; el resultado, tanto en Castell Coch como en el castillo de Cardiff, donde también colaboraron ambos personajes, es un par de edificios sin igual en el mundo.

Iglesia de Notre Dame du Haut, Ronchamp, Francia.

Esta creación de Le Corbusier en Ronchamp, cerca de Belfort, es una de las iglesias menos convencionales que jamás se han construido. El edificio de hormigón armado, construido entre 1950 y 1955, presenta una silueta interesante desde todos los puntos de vista. El tejado se eleva formando una aguja con un alero exagerado, que desde algunos puntos parece un almohadón. Una serie de ventanas muy hundidas, de forma irregular y con cristaleras de colores, iluminan el interior con una aparente confusión de ángulos y formas.

El Coliseo, Roma, Italia.

El gran anfiteatro ovalado de Flavio, situado cerca del extremo sureste del Foro, debe su nombre a la enorme estatua de Nerón que se alzaba en sus proximidades. Lo empezó a construir Vespasiano en el año 75 d.C. y lo inauguró su hijo Tito en 80 d.C., para servir de escenario a combates de gladiadores y luchas contra fieras. Está construido de hormigón, revestido de mármol travertino, con una longitud de 188 metros y una anchura de 156, lo que le convierte en el más imponente de los monumentos romanos que han sobrevivido hasta nuestros tiempos. La fachada, de 48 metros de altura, tiene cuatro plantas, las tres primeras con arcadas dóricas, jónicas y corintias, y la cuarta cerrada, con pilastras y ventanas corintias. Las gradas, sostenidas por corredores concéntricos de techos abovedados, tenían capacidad para unos 45.000 espectadores; y debajo de la arena, que mide 87 por 54 metros, hay almacenes y jaulas para los animales.

El Escorial, cerca de Madrid, España.

Felipe II construyó El Escorial entre 1563 y 1584 para conmemorar la victoria española sobre los franceses en la batalla de San Quintín (1557). El complejo rectangular, que mide 205 por 160 metros, incluye la iglesia de San Lorenzo y un mausoleo en el que reposan los restos de todos los monarcas españoles, con excepción de Alfonso XIII (fallecido en 1941). También comprende un monasterio, un palacio, oficinas, biblioteca y una escuela, todo ello en cinco grandes claustros.

Los macizos y austeros edificios diseñados por Juan Bautista de Toledo y Juan Herrera son de granito gris y resultan más impresionantes que hermosos. El plano de la grandiosa pero sobria iglesia sigue el diseño de una cruz griega, con nave y transeptos de igual longitud, y la monumental cúpula tiene 18 metros de diámetro y 97 de altura. En la actualidad, El Escorial contiene una magnífica colección de pinturas, libros antiguos y manuscritos.

Apéndice

Abadía de Fonthill, Wiltshire, Inglaterra.

La mansión señorial de Fonthill, ya desaparecida, era una de las construcciones más extravagantes jamás levantadas en un país donde abundan los edificios excéntricos. Su creador, William Beckford, había heredado una gran fortuna, procedente en su mayor parte de plantaciones en las Antillas. Beckford, admirador del estilo gótico, encargó a James Wyatt que diseñara un edificio capaz de compararse con la cercana catedral de Salisbury. Se necesitaron once años de trabajo continuado, con dos equipos de 500 trabajadores turnándose, para construir la estructura cruciforme, que quedó terminada en 1808.

La parte principal medía 95 por 75 metros, el techo del Gran Salón se encontraba a 25 metros de altura, y había dos largas galerías, pero lo que más admiración causaba a los pocos visitantes que Beckford admitía era la torre que remataba el crucero, de planta octogonal y 84 metros de altura. Sin embargo, esta torre acarrearía la ruina al edificio. Ante la impaciencia de Beckford por ver su mansión terminada, el desaprensivo constructor decidió omitir en los cimientos los arcos invertidos, y el resultado fue que la torre se derrumbó en 1825, aunque para entonces Beckford ya había vendido la mansión. Jamás se reconstruyó, y a los treinta años de su inauguración ya había desaparecido el resto del enorme edificio.

Hagia Sofia, Estambul, Turquía.

La gran iglesia bizantina de Hagia Sofia (Santa Sabiduría), un remanso de serenidad en el frenesí de la moderna Estambul (la antigua Constantinopla), fue construida por Justiniano entre 532 y 537. Era la tercera iglesia que se alzaba en el mismo emplazamiento. El exterior es una mezcolanza de semicúpulas y contrafuertes, con cuatro minaretes en las esquinas, que se añadieron en época posterior. Pero el interior, con una superficie de 8.190 metros cuadrados, y la cúpula, de más de 30 metros de diámetro, son verdaderamente espléndidos.

Justiniano importó pórfido rojo, serpentina verde y mármoles blanco y amarillo, y contrató escultores y diseñadores de mosaicos con el fin de crear la iglesia más magnífica de toda la cristiandad. Cuando Constantinopla cayó en poder de los turcos otomanos en 1453, Hagia Sofia se convirtió en mezquita y sus mosaicos se taparon con yeso. Por último, en 1934 se transformó en un museo.

Herrenchiemsee y Neuschwanstein, Baviera, Alemania.

Varios de los edificios más opulentos y fantásticos del mundo fueron concebidos por el excéntrico y romántico rey Luis II de Baviera, mecenas de Wagner.

Herrenchiemsee, construido sobre la más grande de las tres islas del mayor lago de Baviera, era el Versalles de Luis II. La primera piedra se colocó en 1878, y a la muerte del rey Luis en 1886 sólo se habían terminado el bloque central y parte de un ala. Sin embargo, ya para entonces contenía algunos de los objetos más magníficos que jamás se habían realizado para un palacio: el candelabro de porcelana más grande del mundo, hecho en Meissen; el Salón de los Espejos, superior al de Versalles; cortinas que pesaban un quintal cada una; una puerta con placas de porcelana de Meissen como paneles...

Como contraste, Neuschwanstein es una reproducción de un castillo medieval, construida en lo alto de una escarpada montaña, en la que hubo que volar los seis metros superiores para nivelar el terreno. El espectacular emplazamiento del castillo, rodeado de cumbres alpinas, convierte en memorable esta fantasía, digna de un cuento de hadas. Las obras comenzaron en 1869, y todavía se estaban aplicando los toques finales cuando murió el rey Luis. Además de las instalaciones más tradicionales, existía un despacho real que comunicaba con una gruta artificial, con cascada y efectos luminosos variables, que se adaptaban al estado de ánimo del monarca.

Knole, Kent, Inglaterra.

Vista desde lejos, al extremo de su parque de 400 hectáreas, la mansión señorial de Knole parece una aldea medieval. Tiene fama de ser la casa (no palacio) con más habitaciones del mundo: 365. La mansión, estructurada en torno a siete patios, se empezó a construir en 1456 por encargo del arzobispo de Canterbury, Thomas Bourchier, que la legó al arzobispado. Enrique VIII coaccionó al arzobispo Cranmer para que se la donase a él, y el codicioso monarca la amplió considerablemente, siendo casi seguro que fue él quien hizo construir la impresionante fachada oeste, de 100 metros de longitud, para el numeroso cortejo que acompañaba al monarca y a los ministros que le visitaban. El Gran Salón, pensado en un principio como comedor, medía treinta metros por diez. La Galería de Cartones para Tapices es aún más larga, con 42 metros.

La Torre Inclinada, Pisa, Italia.

Esta torre románica redonda, que servía de campanario al baptisterio contiguo, se empezó a construir en 1174. El arquitecto, Bonnano Pisano, empleó exclusivamente mármol blanco. La torre, con ocho plantas de columnatas con arcos, tiene una altura de 54 metros. Comenzó a inclinarse nada más quedar terminado el primer piso, probablemente a causa de un corrimiento del subsuelo aluvial, o quizá porque los cimientos eran defectuosos. Se llevaron a cabo ingeniosos intentos de compensar la inclinación, enderezando los pisos superiores y haciendo más altas las columnas por el lado sur que por el norte. El campanario propiamente dicho, que se terminó en 1350, también se construyó en ángulo, y las campanas más pesadas están colgadas por el lado norte; a pesar de todo, la torre continuó inclinándose, y en la actualidad se desvía más de cinco metros de la perpendicular.

Catedral de Lincoln, Inglaterra.

Considerada como el mejor ejemplo del estilo gótico primitivo inglés, la catedral de Lincoln ostentó el título de edificio más alto del mundo entre 1307 (cuando su torre central alcanzó los 160 metros de altura, superando a la pirámide egipcia de Keops) y 1548, cuando se derrumbó durante una tormenta. El viajero y escritor William Cobbett la consideraba «el edificio más bello del mundo entero». Su emplazamiento, en lo alto de una colina que domina Lincoln, le confiere una espectacularidad sin parangón con ninguna otra catedral, exceptuando la de Durham.

La construcción comenzó hacia 1075 por orden del obispo Remigio, y la consagración se celebró en 1092. Durante el siglo XII, un terremoto causó graves desperfectos, que obligaron a reconstruirla, tarea emprendida hacia 1190 por el obispo san Hugo de Lincoln. Entre otros motivos de orgullo, la catedral cuenta con cientos de estatuas que decoran el exterior, tallas de gran calidad en el coro, y una biblioteca diseñada por Christopher Wren. Las agujas que en otro tiempo remataban las dos torres occidentales fueron desmanteladas en el siglo XVIII, a pesar de las airadas protestas de los habitantes de Lincoln.

Torre Nat-West, Old Broad Street, Londres, Inglaterra.

La sede del National Westminster Bank es el edificio voladizo más alto del mundo y el bloque de oficinas más alto de Gran Bretaña. Su torre, que se alza a 90 metros de altura sobre la City de Londres, tiene tres plantas de sótanos y 49 pisos, sostenidos por soportes de acero y hormigón que sobresalen de una torre central. Fue diseñada por Richard Seifert y se terminó de construir en 1979.

Palm House, Kew Gardens, Londres, Inglaterra.

Tras la visita de la reina Victoria al invernadero de Paxton en Chatsworth (ver p. 64), se decidió construir una estructura similar en el Real Jardín Botánico de Kew. Los dos arquitectos encargados fueron Decimus Burton y Richard Turner. Burton había trabajado como ayudante de Paxton en Chatsworth y Turner había colaborado en la construcción del palmeral del Jardín Botánico de Belfast.

Las obras se iniciaron en 1844 y el resultado fue la mayor estructura de su tipo, con 110 metros de longitud, 30 de anchura en el centro y 20 de altura. Columnas de hierro forjado sostienen los montantes curvos de las paredes y el techo, y junto a la estructura hay una sala de calderas que proporciona calefacción por medio de tuberías que llegan a través de un túnel.

El Partenón, Atenas, Grecia.

El Partenón se construyó para servir de templo de la diosa Atenea, entre 447 y 438 a.C. Consta de una base rectangular, de 72 por 30 metros de lado, con columnatas en los cuatro lados, rodeando las dos pequeñas estancias de la nave: la cámara del tesoro de la ciudad y una sala que albergaba la suntuosa estatua de Atenea, en oro y marfil. El tejado era de poca pendiente, con un frontón triangular en cada extremo. Pero estas formas geométricas aparecían suavizadas y embellecidas por sutiles variaciones, que convierten al Partenón en el más perfecto de los edificios de la antigua Grecia. Todas las líneas horizontales se curvan hacia arriba en el centro, y las columnas, que se engrosan ligeramente en la parte central y adelgazan en lo alto, están inclinadas hacia dentro.

El templo se construyó con bloques de mármol, perfectamente encajados sin necesidad de cemento o argamasa, y está decorado con relieves adornados con bronce y oro. En lo alto de la nave, un friso tallado recorre todo el perímetro. Sobre las columnas hay paneles tallados, y los frontones están decorados con magníficos altorrelieves que representan el nacimiento de Atenea y la batalla entre la diosa y Poseidón, dios del mar, que decidió el destino de Atenas.

Petra, Jordania.

En 1812, el viajero suizo J. L. Burckhardt redescubrió la antigua ciudad de Petra, «una ciudad roja como una rosa y tan antigua como el tiempo», que fue la próspera capital de los nabateos durante unos 500 años, desde el siglo II a.C. hasta principios del siglo IV d.C. Lo que convierte a Petra en uno de los monumentos arqueológicos más espectaculares del mundo es su emplazamiento, rodeado de montañas peladas, más los fabulosos relieves realizados por los nabateos, y las construcciones romanas añadidas tras la anexión de la ciudad en 106 d.C. A Petra sólo se puede llegar por una estrecha garganta de 600 metros, el Siq, que discurre entre paredes casi verticales de 100 metros de altura. Este acceso resultaba inexpugnable, y se podía defender con un pequeño grupo de soldados.

Los nabateos eran maestros de la talla de piedra, y el Jazna, o Tesoro, que es el primer edificio que se encuentra al final del Siq, constituye un ejemplo espectacular de su arte. El Jazna es un edificio de estilo griego, probablemente un templo, tallado en la misma roca de color rosa anaranjado. Los edificios nabateos, excavados en las paredes de roca, se encontraban protegidos contra los desprendimientos, y han quedado mucho mejor conservados que las construcciones romanas de época posterior. De éstas, la que se ha mantenido en mejores condiciones es el anfiteatro, con capacidad para 3.000 espectadores en 33 gradas de asientos. La colonia romana, de más de tres kilómetros de extensión, tenía tres mercados, templos, un foro, baños, gimnasios, columnatas y numerosas tiendas y casas particulares.

Pompeya, Nápoles, Italia.

Esta ciudad, fundada en el siglo V a.C., estuvo en principio bajo el dominio griego; pero en el año 79 d.C., cuando quedó destruida por una erupción del Vesubio, se había convertido en una ciudad de 25.000 habitantes, donde acudían a veranear los romanos ricos. La excavación sistemática de las ruinas no comenzó hasta 1748, y una tercera parte de la ciudad todavía continúa sepultada.

Casi todas las mansiones, templos, baños y edificios públicos, así como el foro y el anfiteatro, son de estilo romano. Se trata de construcciones de ladrillo, revestido de mármol o yeso, y algunas de ellas, como la Casa dei Vettii, están decoradas con magníficos frescos. Las calles, pavimentadas y con aceras muy altas, están profundamente surcadas por las ruedas de carros y atravesadas por hileras de piedras para que cruzaran los peatones. Los restos de edificios y personas que se van desenterrando proporcionan valiosísimos datos sobre la vida en esta antigua ciudad.

Centro Pompidou, París, Francia.

Este enorme museo y centro de exposiciones, diseñado por Richard Rogers y Renzo Piano y terminado en 1975, es uno de los edificios modernos que más controversia ha desatado. Carece de fachada formal y está construido a base de gigantescas vigas de acero, pintadas en colores primarios brillantes —rojo, amarillo y azul—, que se ven perfectamente a través de las paredes de cristal, lo mismo que los ascensores exteriores y las galerías de comunicación.

La estructura consta de cinco plantas, con unos 110 metros de longitud y 48 de anchura, y una superficie de 113.500 metros cuadrados en la planta baja. En su interior hay un museo de arte moderno con 37.500 metros cuadrados de exposición, institutos de investigación para la creación industrial, la música y la acústica, una biblioteca y un restaurante.

Ponte Vecchio, Río Arno, Florencia, Italia.

El Ponte Vecchio, construido en 1345 por Taddeo Gaddi, fue el primer puente de Occidente con arcos de menos de un semicírculo. Esto significa que se necesitaban menos pilares para sostenerlos, lo cual permitía el paso de embarcaciones y, sobre todo, de agua, ya que el Arno experimenta fuertes crecidas en primavera a consecuencia del deshielo.

A cada lado de la calzada hay una galería de dos plantas. La galería superior conectaba el palacio Uffizi, sede de las oficinas de la familia Médici, con el palacio Pitti, al otro lado del río. Al nivel de la calle había, y todavía hay, tiendas ocupadas por orfebres y joyeros.

Castillo de Praga, Hradvany, Praga, Checoslovaquia.

El «castillo» de Hradvany, que comenzó siendo una fortaleza de madera construida hacia 850, es el más grande del mundo y, como el Kremlin de Moscú, más que una fortaleza es un complejo de edificios, agrupados en torno a tres patios, que ocupa una superficie total de 7,2 hectáreas. Para penetrar en el castillo, los visitantes entran por la ornamentada puerta de Matías, y encuentran en su recorrido muestras de arquitectura de principios del siglo XX, seguidas de construcciones barrocas, renacentistas y góticas, hasta llegar a las grandes torres medievales, la torre Blanca y la Dalibarka.

Los edificios más impresionantes son el palacio real y la catedral gótica de San Vito, diseñada en 1344 por Matías de Arras; se trata de la tercera construida sobre el mismo emplazamiento: la primera fue fundada hacia 930 por el príncipe Wenceslao, actual santo patrón del país. Por lo menos desde 894, el castillo ha servido como sede oficial y lugar de coronación de los soberanos checos, y todavía se celebra allí la investidura de los presidentes, que tiene lugar en el enorme salón Valdislav, de estilo gótico tardío, que mide 74 metros de longitud, 18 de anchura y 15 de altura.

El Pabellón Real, Brighton, Sussex, Inglaterra.

En sus orígenes, el Pabellón Real fue una pequeña granja, reformada y ampliada durante más de 35 años —de 1786 a 1821— para satisfacer los caprichos del príncipe de Gales, que luego se convertiría en rey Jorge IV. Sus fantásticos pináculos y cúpulas, que deben mucho a la arquitectura islámica de la India, se construyeron en 1815, y fueron obra de John Nash, que empleó, por primera vez en la arquitectura doméstica, hierro fundido como base estructural y decorativa, y no sólo para los marcos de ventanas y chimeneas.

Si el exterior resulta asombroso, el interior lo es aún más, ya que Nash construyó también

una enorme sala de banquetes con techo de cúpula, y una sala de música, ambas decoradas con delirante extravagancia. Grandes dragones se enroscan alrededor de las paredes y el techo de la sala de música, pintados de rojo y azul con incrustaciones de oro. También el salón de banquetes está pintado con motivos exóticos, y de su techo cuelga una lámpara enjoyada que pesa casi una tonelada.

Catedral de San Pablo, Ludgate Hill, Londres, Inglaterra.

La primera piedra de la obra maestra de Christopher Wren se colocó en 1675, y la catedral quedó terminada en 1710. El conjunto de la nave y el coro mide 141 metros de longitud, y sobre el crucero hay una cúpula de 137 metros de diámetro y 65 de altura, cubierta de mosaicos. La cúpula está sostenida por pilares, agrupados en las esquinas para proteger las oficinas y la escalera que sube a la biblioteca. En un principio, estos pilares se construyeron de piedra y estaban rellenos de cascotes; en los años treinta se reforzaron inyectando hormigón líquido, lo cual seguramente permitió que resistieran los bombardeos de la segunda guerra mundial.

La cúpula está formada por tres capas. Sobre la semiesfera interior hay una estructura cónica de ladrillo, que sostiene la cúpula exterior, con estructura de madera recubierta de plomo. Está rematada por una linterna con columnas y una enorme cruz dorada, situada a 110 metros de altura sobre el suelo.

En la fachada occidental se alzan dos torres de 68 metros de altura; y en la fachada sur, un campanario con una campana de 17 toneladas, el Gran Paul, la mayor de toda Inglaterra.

Palacio de Versalles, Versalles, Francia.

Este palacio, construido sobre el emplazamiento de un refugio real de caza, fue el producto triunfal de la ambición del rey Luis XIV y de los diseños de los grandes arquitectos del estilo clásico: Le Vau, Le Brun y Hardouin Mansart. Su construcción, que comenzó en 1661, duró cincuenta años. El palacio con sus jardines ocupa una extensión de 2.400 hectáreas.

Casi toda la fachada occidental, de unos 640 metros de longitud, fue construida por Le Vau en 1669; en 1678, Mansart cerró la terraza abierta para crear la sala más espléndida del palacio, la galería de los Espejos, de 72 metros de longitud, con 17 ventanas altas de arco y 17 falsas ventanas con espejos en marcos de cobre dorado; tanto las ventanas como los espejos están separados por columnas de mármol rojo. El techo, decorado con pinturas, está enmarcado por una cornisa de estuco dorado. La sala estaba ambueblada con muebles y lámparas de plata y suntuosas alfombras, para reflejar la magnificencia del Rey Sol.

Castillo de Windsor, Berkshire, Inglaterra.

La residencia real de Windsor, que Guillermo el Conquistador empezó a construir en 1067, es el castillo habitado más grande del mundo. Su planta tiene, aproximadamente, la forma de un ocho, y la muralla tiene una extensión de más de 600 metros. La gran mole cilíndrica de la fortaleza, que domina el paisaje urbano de los alrededores, fue construida por Enrique I, que fue el primero en utilizar piedra para la construcción del castillo. Desde entonces, la altura de la fortaleza se ha ido elevando hasta alcanzar 30 metros, y se ha reforzado la muralla exterior. A finales del reinado de Eduardo III, el castillo había dejado de ser una fortaleza militar para convertirse principalmente en residencia real. Los sucesivos monarcas reformaron y ampliaron el castillo, pero éste aún conserva un aspecto medieval. La principal de las adiciones fue la capilla de la Orden de San Jorge, construida por orden de Eduardo IV.

Resto del mundo

Angkor Wat, Angkor, Camboya.

El conjunto de templos de Angkor Wat, uno de los complejos religiosos más grandes del mundo, ocupa una extensión de casi 2,5 kilómetros cuadrados. Se construyó con arenisca entre 1113 y 1150, bajo el reinado de Suryavarnam II, al que debía servir de sepulcro. Estaba dedicado al dios Visnú y representa toda la cosmología hindú.

Al templo principal, rodeado por un foso que representa los océanos, se accede por una calzada de 300 metros. En la muralla exterior, símbolo de las montañas que forman el borde del mundo, hay una magnífica puerta de entrada a cinco recintos rectangulares concéntricos, en los que se alzan torres con forma de flores de loto, la mayor de las cuales alcanza una altura de más de 60 metros. Las cinco torres centrales representan las cumbres del monte Meru, el centro del universo. Los patios están conectados por columnatas adornadas con delicadas esculturas e inmensos bajorrelieves que representan escenas de las leyendas religiosas hindúes, y que constituyen el elemento más espectacular del templo.

Chandigarh, Punjab, India.

El concepto que Le Corbusier tenía de la ciudad ideal se materializó en parte en la capital administrativa del Punjab, fundada en 1951, para la que diseñó los principales edificios: el palacio del Parlamento, el Tribunal Supremo y el Secretariado. Sus colosales dimensiones los convierten en símbolos adecuados del gobierno, pero han resultado poco funcionales, debido en parte a la distancia entre uno y otro, que resulta muy incómoda con el calor reinante en Punjab. El radical alejamiento de las tradiciones arquitectónicas formaba parte de la política del primer ministro Nehru en los primeros tiempos de independencia de la India, que pretendía que los edificios simbolizaran la libertad de la nación.

Fatehpur Sikri, Uttar Pradesh, India.

En 1569, el emperador Akbar construyó una mezquita y una tumba en Fatehpur Sikri, en honor del ermitaño Salim Chisti, que había predicho el nacimiento de su hijo, el futuro emperador Jahangir. Poco a poco se fueron construyendo allí edificios públicos y palacios, y en 1588, la ciudad, rodeada por murallas fortificadas, se convirtió en la capital de Akbar. En 1605, la ciudad quedó abandonada, debido a una escasez de agua.

Fatehpur Sikri, construida con arenisca blanda de color rosa, que es muy fácil de tallar, constituye una exquisita muestra, casi intacta, de la arquitectura mongol. Destacan en ella la puerta de la Victoria o Buland Darwaza, con sus inmensas estatuas de elefantes; la magnífica fachada de la Gran Mezquita o Jami Masjid; el mausoleo de mármol de Salim, con sus bellas tracerías y sus incrustaciones de esmalte y madreperla, y los palacios de Jodh Bai y Birbal.

Gran Zimbabue, Zimbabue.

El monumento de piedra más grande de África (sin contar los egipcios) es un complejo de ruinas conocido como el Gran Zimbabue y situado a 400 kilómetros, tierra adentro, del puerto de Sofala, en el océano Índico. Las construcciones de la Acrópolis, o fortalezas de la colina, dominan sobre las del Gran Recinto, abajo en el valle. Este gran recinto está rodeado por una muralla de piedra de 250 metros de circunferencia, de 5 a 10 metros de altura, y por lo menos 1,20 metros de grosor, hecha con bloques de granito gris azulado, cortados y colocados como ladrillos. En el interior hay otros muros que forman estrechos pasadizos, tres plataformas, varias «cámaras» y una torre cónica y maciza.

Se ignora quiénes fueron los constructores del Gran Zimbabue, y cuál era su función, pero lo más probable es que se fundara hacia el siglo X, como centro comercial para el intercambio de mercancías de una próspera comunidad de la Edad de Hierro y para el tráfico de esclavos negros hacia Arabia.

Sede central de la Corporación Bancaria de Hong Kong y Shanghai, Hong Kong.

Esta maravilla de innovación técnica, diseñada por Norman Foster y terminada en 1986,

se compone de tres torres de diferentes alturas y apariencia visual, cuya sección central, de 47 plantas, alcanza una altura de 180 metros. Todo el conjunto está suspendido sobre una plaza a ras del suelo, mediante ocho inmensas torres de acero revestido de paneles de aluminio. La estructura de acero descubierto está dividida en cinco zonas verticales, desde las cuales cuelga un conjunto de plataformas de acero ligero y hormigón, suspendidas mediante armaduras de acero que parecen perchas gigantes para la ropa (un método derivado de la construcción de puentes). Estas plataformas se construyeron básicamente a partir de módulos prefabricados en EE UU, Gran Bretaña y Japón.

En la cara sur del edificio hay un panel solar de 24 espejos controlado por ordenador, que sigue la trayectoria del sol y refleja sus rayos hacia lo alto del atrio central, de 45 metros de altura, desde donde se difunde por todo el edificio.

Templo de Hoysaleswara, Halebid, Karnataka (Mysore), India.

La dinastía Hoysala, que reinó en esta región durante unos 250 años, hasta 1326, alcanzó el apogeo de su poder durante el reinado de Bittiga (1110-52), que adoptó el nombre de Vishnuvardhana al convertirse al hinduismo. El más sobresaliente de los templos que hizo construir para su nueva religión fue el de Hoysaleswara, en la ciudad de Halebid, capital de su reino.

En sí mismo, el pequeño templo en forma de estrella y de poca altura no resulta muy impresionante; son las intrincadas esculturas que cubren todas sus superficies las que convierten a este templo en la cumbre artística del período Hoysala. Están talladas en esteatita, una piedra blanda que se endurece al exponerse a la intemperie, y representan episodios de las vidas de los príncipes: escenas de caza, descripciones de la vida rural, animales, pájaros y, sobre todo, músicos y bailarinas.

También existen aquí una estatua gigantesca del dios jainista Gommateshwara y otra del toro del dios hindú Siva.

Nueva Delhi, India.

La ciudad de Nueva Delhi, en la orilla derecha del río Jumna, fue diseñada por Edwin Lutyens y Herbert Baker, y se construyó entre 1912 y 1929 para sustituir a Calcuta como capital y centro administrativo de la India británica. Sus amplias calles tienen un trazado simétrico, que ofrece buenas vistas de los magníficos edificios oficiales y los numerosos monumentos históricos, entre los que figura un arco triunfal erigido en 1921. De este arco parte una amplia avenida flanqueada de árboles, el Raj Path, que conduce a un espléndido palacio de mármol y arenisca, que antes servía de residencia al virrey y en la actualidad es la residencia oficial del presidente indio.

En un terreno de oraciones situado al sur de esta ciudad fue asesinado en 1948 el mahatma Gandhi.

Polonnaruwa, cerca de Sigiriya, Sri Lanka.

La antigua ciudad de Polonnaruwa, construida en un bellísimo emplazamiento a orillas de un lago, fue en otros tiempos la más magnífica de todo Sri Lanka (antes Ceilán). Ya en 368 servía de residencia real, y durante el siglo VIII fue la capital de la isla. Su período de mayor importancia coincidió con el reinado de Parakrama Bahu I, el más famoso de los reyes cingaleses, que reinó de 1164 a 1197. A este período corresponden las principales ruinas, entre las que destaca el imponente templo de Jetawanarama, de 50 metros de longitud, con muros de 25 metros de altura y 3,5 de grosor, y una inmensa estatua de Buda en posición reclinada.

Palacio de Potala, Lhasa, Tíbet.

Con sus mil ventanas y sus relucientes tejados dorados que se ven a muchos kilómetros de distancia, la impresionante estructura del Potala domina Lhasa desde lo alto de una montaña. Durante más de 300 años, hasta que China se anexionó el Tíbet en 1951, Potala sirvió como fortaleza-palacio de los dalai lamas, dirigentes espirituales del Tíbet; en la actualidad está convertido en museo.

Las murallas de piedra encalada del Palacio Blanco, construido en 1648, rodean al Palacio Rojo, que se terminó en 1694. Aquí se encuentra el núcleo religioso del complejo, con salas de reunión para los monjes, bibliotecas de escrituras budistas, capillas, santuarios y, destacando sobre todo ello, la pagoda funeraria del quinto dalai lama, fundador de Potala, que mide 15 metros de altura. Está construida en madera de sándalo y recubierta con cuatro toneladas de oro, con incrustaciones de diamantes, rubíes y zafiros.

Taj Mahal, Agra, India.

El Taj Mahal, uno de los edificios más famosos del mundo, es un extraordinario capricho, una celebración personal del amor que sentía Shah Jahan, emperador mongol del siglo XVII, por su reina, Mumtaz Mahal, que falleció en 1631 tras haberle dado 14 hijos en 17 años de matrimonio. Las obras del edificio comenzaron el mismo año de su muerte.

Durante los 20 años siguientes, 20.000 hombres y mujeres trabajaron para convertir los dibujos de un arquitecto —cuya identidad permanece sumida en el misterio— en un deslumbrante mausoleo blanco. Se contrataron artesanos de toda Asia, y miles de elefantes y bueyes arrastraron innumerables bloques de mármol a lo largo de una rampa de tierra apisonada de 16 kilómetros de longitud, que llevaba hasta el lugar de las obras. Las superficies del Taj Mahal tenían incrustaciones de piedras preciosas y semipreciosas, que fueron robadas durante el turbulento siglo XVIII. La parte más impresionante del edificio es la cúpula, cuyo florón se encuentra a 67 metros de altura.

El Taj Mahal quedó muy descuidado tras la muerte de los hijos de Shah Jahan, y durante el Raj se llegó a pensar incluso en desmantelarlo y vender el mármol en Inglaterra. Pero gracias al renovado interés por el patrimonio arquitectónico de la India, que tuvo en lord Curzon a su principal exponente, se decidió por fin restaurar el mausoleo y sus jardines.

Pagoda de Schwedagon, Rangún, Birmania.

En un terreno de poco más de cinco hectáreas en lo alto de un monte que domina la ciudad de Rangún, y rodeada de cientos de pagodas más pequeñas, se alza la pagoda de Schwedagon, el santuario budista más espléndido de toda Birmania.

Según la leyenda, la primera de las pagodas se construyó en el siglo VI a.C.; la actual *stupa* se construyó en 1768 por orden del rey Hsibyushin, para sustituir a otra anterior, destruida por un terremoto. El bloque central, de forma acampanada, se alza sobre una serie de terrazas rectangulares y octogonales, todas ellas chapadas de oro puro, y alcanza una altura de más de 90 metros, en secciones cada vez más pequeñas, culminando en un *hti* o «sombrilla» de hierro dorado, del que cuelgan campanas de oro y plata, y rematado por una veleta enjoyada y un orbe que lleva incrustados unos 4.000 diamantes.

Apéndice

PROEZAS DE LA INGENIERÍA CIVIL

Las Américas

Puente-túnel de la bahía de Chesapeake, Virginia, EE UU.

El puente-túnel más largo del mundo se inauguró en abril de 1964, tras 42 meses de obras que costaron 200 millones de dólares. Esta combinación de caballetes, puentes y túneles, de 28 kilómetros de longitud, comunica Norfolk con la punta del cabo Charles. Para mantener abierto al tráfico el canal de la bahía de Chesapeake, se construyeron dos túneles revestidos de hormigón, de 1,6 kilómetros de longitud y 7 metros de diámetro, que discurren muy por debajo del canal principal y conectan dos islas artificiales, de 450 metros de longitud cada una. La sección principal se apoya en 20 kilómetros de caballetes de hormigón, de 9,5 metros de anchura y situados a 7,5 metros sobre el nivel medio de la marea baja, capaces de resistir olas de seis metros.

Puente Golden Gate, San Francisco, EE UU.

Aunque tiene ya más de cincuenta años de edad, este puente aún está considerado como una de las obras maestras de la ingeniería civil en todo el mundo. Cuando Joseph Strauss completó sus planos en 1930, el puente tenía el ojo más largo del mundo, 1.280 metros, y no fue superado hasta 1964 por el puente de Verrazano Narrows, en Nueva York, que tiene un ojo de 1.298 metros.

En su construcción se emplearon más de 100.000 toneladas de acero, 526.000 metros cúbicos de hormigón y 128.000 kilómetros de cable. La longitud total, incluyendo los accesos, es de 11,2 kilómetros. Las torres miden 227 metros de altura, y tiene dos pilares de soporte, el mayor de los cuales penetra treinta metros bajo el mar. Durante la marea baja, la calzada queda a 67 metros por encima del agua.

El mayor obstáculo que tuvieron que superar los ingenieros para construir el Golden Gate fue el tendido de los cimientos, debido a las fuertes mareas. Los buceadores sólo podían trabajar durante cuatro períodos de 20 minutos al día, cuando cambiaba la marea y el agua quedaba más tranquila. Fracasaron varios intentos sucesivos de construir una base, dentro de la cual levantar los pilares del puente, lo cual obligó a los ingenieros a construir en su lugar una caja-dique, que se mantenía seca por medio de bombas. El puente se inauguró en mayo de 1937 y su construcción costó 35 millones de dólares.

Puente de Quebec, Canadá.

Es el puente voladizo de ojo más largo del mundo, con 548 metros, y está construido sobre el río San Lorenzo, a cierta distancia de Quebec, para aprovechar un estrechamiento del río, que en este punto mide sólo unos 400 metros de anchura, en lugar de los tres o cuatro kilómetros que mide en los demás lugares. En el mismo lugar existía anteriormente otro puente, que se hundió, y las obras del puente actual comenzaron en 1899 y estuvieron plagadas de dificultades. A pesar de las advertencias, no se tuvo en cuenta la excesiva desviación que se iba produciendo al avanzar la construcción, hasta que el puente se hundió en 1907, matando a 75 trabajadores, por culpa de un número inadecuado de remaches en uno de los brazos voladizos y del arqueamiento de una viga.

Hubo que diseñar de nuevo el puente para hacerlo más resistente: se aumentó su longitud a 1.000 metros y se utilizó un 150 por 100 más de acero. A pesar de ello, en 1916 volvió a producirse un desastre cuando se estaba instalando el brazo suspendido: una pieza se rompió, y el bloque de 195 metros y 5.000 toneladas cayó al río, causando la muerte a 13 obreros. El tercer intento tuvo éxito, y el tren inaugural atravesó el puente en diciembre de 1917. En 1929 se añadió una calzada para automóviles.

Puente colgante del Niágara, río Niágara, EE UU, y Canadá.

El primer puente colgante moderno se abrió al tráfico ferroviario y de pasajeros en 1855, entre funestos augurios de que se vendría abajo en cuanto soplara un viento fuerte. Pero el puente, de doble plataforma y con un ojo mayor de 250 metros, demostró su solidez, gracias a que su creador, John A. Roebling, había comprendido que un puente colgante no sólo tiene que ser fuerte sino también estable. La resistencia se garantizó mediante dos cables de 25 cm de diámetro a cada extremo, cada uno de los cuales sostiene una de las plataformas, de tres metros de anchura. La estabilidad se consiguió mediante 64 sostenes y vigas de madera, insertadas entre las plataformas. Pero los cables de hierro se fueron deteriorando poco a poco, y en 1897 el puente colgante de Roebling fue sustituido por una estructura de arcos de acero, que a su vez fue reemplazada por el puente del Arco Iris (Rainbow Bridge).

Segundo puente del lago Washington, Seattle, Washington, EE UU.

El puente flotante más largo del mundo, con 3.780 metros de longitud total y 2.250 de sección flotante, es el puente de Lacey V. Murrow, que se terminó de construir en 1963 y atraviesa el lago Washington a la altura de la Interestatal 90. El lago era demasiado profundo —45 metros— para tender sobre él un puente convencional, pero, al no existir corrientes ni hielo, un puente de pontones resultaba ser la solución ideal. Cada uno de los 25 pontones de hormigón armado mide 105 metros de longitud, 18 de anchura y 4,2 de altura hasta la carretera. El interior de los pontones está dividido en compartimentos estancos. Además de la sección flotante, hay tres arcos de hormigón armado para permitir el paso de embarcaciones pequeñas.

Europa

Muelle de Southend, Essex, Inglaterra.

El muelle más largo del mundo se construyó en un lugar de vacaciones que ya estaba muy concurrido a principios del siglo XIX. El primer muelle, de madera, se empezó a construir en 1829, y en 1846 se alargó, de 548 metros a 2.000. En 1887, la empresa Arrol Bros lo reconstruyó casi por completo, siguiendo un diseño de J. Brunlees. El nuevo muelle medía 2.000 metros de longitud y se reformó y amplió en varias ocasiones, hasta alcanzar casi los 2.150.

Los muelles tienen dos funciones principales: permitir que los paseantes disfruten del aire marino fuera de la playa y servir como embarcadero para los barcos de recreo, sin tener que utilizar botes para llevar a los pasajeros a tierra. Muchos muelles disponían además de teatro, bares y tiendas. En Southend, un ferrocarril eléctrico de vía estrecha comunicaba la playa con el pabellón de tres plantas situado en el extremo más alejado, provisto de estación guardacostas y botes salvavidas.

Puente ferroviario de Forth, Fife, Escocia.

El elegante puente voladizo que atraviesa el Firth of Forth, diseñado por John Fowler y Benjamin Baker (que también diseñaron el tubo en el que se trasladó a Londres la aguja de Cleopatra) fue el primer puente de acero de cierto tamaño que se construyó en Europa. Los recelos provocados por los malos resultados de varios puentes ferroviarios de acero construidos en Holanda indujeron a la Cámara de Comercio a prohibir el empleo de este metal en la construcción de puentes hasta 1877. Los tres pilares sostienen brazos voladizos de 207 metros, unidos por dos piezas colgantes de 105 metros cada una, formando dos arcos principales de 520 metros, que lo convirtieron en el puente de mayor ojo desde su inauguración en 1889 hasta que se terminó el puente de Quebec, en 1917.

Puente Royal Albert, Saltash, Devon, Inglaterra.

La última gran obra del brillante y versátil ingeniero Isambard Kingdom Brunel fue el viaducto que hace pasar el ferrocarril de Cornualles a través del estuario del Tamar, hasta llegar a Devon. Atrajo especial interés por tratarse de la primera obra de envergadura en la que se utilizó aire comprimido para extraer agua de un artesón (cámara de trabajo para tender cimientos bajo el agua).

Brunel desarrolló los conceptos aplicados en un puente anterior y más pequeño que había construido en Chepstow, y diseñó un puente de dos ojos, con dos cortos tramos de acceso curvos. Se trata de una combinación de puente de arco y puente colgante, con una cuerda superior formada por un enorme cilindro de hierro forjado, de sección ovalada, del que cuelgan dos cadenas que forman la cuerda inferior. Los brazos, cada uno de 140 metros de longitud y 1.060 toneladas de peso, se construyeron en la orilla del río y se llevaron en balsa hasta su posición. Brunel no pudo presenciar la inauguración, oficiada por el príncipe consorte en mayo de 1859, por encontrarse gravemente enfermo; falleció cuatro meses después.

Acueducto de Pontcysyllte, Shropshire, Inglaterra.

El acueducto construido por Thomas Telford para atravesar el valle de Dee representó una innovación, por ser la primera vez que se utilizaba hierro forjado para construir el canal y el camino de sirga. En 1795, cuando comenzaron las obras, ya se habían construido varios arcos de puente de hierro forjado, siguiendo el ejemplo de la estructura creada por Abraham Darby en Iron Bridge. Pero Telford incorporó el hierro a la misma artesa del canal, construida en secciones con forma de cuña, con pestañas en los extremos para atornillarlas unas con otras, hasta formar arcos apoyados en pilares de albañilería. Incluso después de haber construido un terraplén a cada lado, se necesitaron 19 arcos, cada uno de 16 metros, para atravesar el valle, lo que da al acueducto una longitud total de 304 metros. Se inauguró en 1805 y todavía circulan por él embarcaciones hacia el canal de Ellesmere.

El Afsluitdijk, dique en el Zuider Zee, Países Bajos.

El Zuider Zee, o mar de Zuider, se formó en el siglo XIII cuando el mar del Norte penetró tierra adentro, englobando un lago. A lo largo de los siglos, se realizaron numerosos intentos de recuperar la tierra inundada, pero para conseguir resultados apreciables fue preciso llevar a cabo una de las mayores proezas de la ingeniería civil en el mundo entero: la construcción, entre 1927 y 1932, del Afsluitdijk, un gigantesco dique de 33 kilómetros de longitud y 7,5 metros de altura, que dividió el Zuider Zee en dos partes: el Ijsselmeer, o mar de Ijssel, y el Waddenzee, o mar de los Wadden.

En las zonas poco profundas, se levantaron dos muros de arcilla con cantos y se rellenó de arena el espacio entre ambas; las paredes inclinadas de la presa se revistieron con haces de retama y piedras. En dos zonas más profundas, se construyeron primero presas con travesaños de madera, que llegaban a 3,5 metros por debajo del nivel medio del agua. La presa tiene una anchura al nivel del mar de 10 metros.

Ya existen cuatro *polders* —tierras recuperadas— con una extensión total de 1.800 kilómetros cuadrados, dedicados a la agricultura o al desarrollo urbano, y pronto se recuperarán otros 400 kilómetros cuadrados, cuando quede terminado un quinto *polder,* el Markerwaard. El mar de Ijssel quedará entonces convertido en un lago de agua dulce, de 1.400 kilómetros cuadrados de extensión.

La barrera del Támesis, río Támesis, Woolwich, Londres, Inglaterra.

La barrera mareal más grande del mundo es la del río Támesis, con una longitud de 520 metros y una altura de 32. Tras casi 13 años de planificación y obras, fue inaugurada en 1984 por la reina Isabel II. Está diseñada para proteger las zonas vulnerables del curso del río contra las inundaciones provocadas por el mar del Norte, y consta de diez compuertas móviles de acero, nueve rompeolas y dos contrafuertes. Cuatro grandes compuertas elevables, cada una de 60 metros de longitud y unas 1.300 toneladas de peso, dan acceso a los principales canales de navegación. Otras dos compuertas menores, de sólo 30 metros, sirven de entrada a dos canales más estrechos. Junto a los contrafuertes hay cuatro compuertas radiales abatibles.

Para facilitar la navegación, cuando se abren las compuertas de los canales, éstas giran unos 90 grados, hasta que su superficie curva queda alojada en un hueco abierto en el fondo del río, quedando el borde superior al nivel del fondo. Las compuertas funcionan mediante un sistema hidráulico.

Puente de la Torre, río Támesis, Londres, Inglaterra.

El monumento más famoso de Londres es, probablemente, el elaborado puente gótico de la Torre, sobre el río Támesis, el primer puente que encuentran los barcos que penetran río arriba. Se construyó entre 1886 y 1894, según un diseño de Horace Jones y John Wolfe Barry. La estructura es de hierro, revestido de piedra de Portland y granito gris, y consta de dos brazos basculantes con contrapesos y dos tramos colgantes que conectan las torres principales, de 62 metros de altura, con las orillas. Cada uno de los brazos basculantes está formado por cuatro vigas principales, de 30 metros, con travesaños de refuerzo, y pesa unas 1.000 toneladas. En un principio, funcionaban con energía hidráulica y tardaban unos seis minutos en abrirse; en la actualidad, la maquinaria es eléctrica y se abren en un minuto y medio. Los peatones pueden cruzar el puente aunque esté abierto, gracias a pasarelas elevadas que van de una torre a otra.

Resto del mundo

Acueducto de Cartago, Túnez.

Este canal de 140 kilómetros, construido por los romanos durante el reinado del emperador Adriano (117-138) era el acueducto más largo de la antigüedad. Conducía agua desde los manantiales de Zaghouan hasta enormes cisternas subterráneas, construidas mucho antes por los cartagineses en Maalaka, a las afueras de su ciudad.

Los pilares que sostienen el canal están espaciados de cinco en cinco metros, y miden cinco metros de altura y 3,5 de grosor. El canal propiamente dicho medía un metro de anchura y dos de profundidad, y se ha calculado que tenía una capacidad de 26 millones de litros al día.

«El gigante Peter», Parque Central de Himeji, Hyobo, Japón.

Las norias de feria más grandes del mundo son «El gigante Peter» y su homóloga de Tsukuba, también en Japón, con capacidad para 384 pasajeros. El diámetro de ambas norias es de casi 85 metros, nueve más que la primera noria diseñada por George Ferris, que se construyó en Chicago en 1893.

Presa de Kariba, río Zambęzi, Zambia y Zimbabue.

La presa de Kariba se encuentra más abajo de las cataratas Victoria, donde el gran río Zambezi se precipitaba rugiendo por la garganta de Kariba. Con sus 128 metros de altura, es una de las presas más grandes del mundo y la cuarta más alta de África. Su estructura arqueada de hormigón tiene una longitud de 580 metros en el borde superior. Se construyó entre 1955 y 1959 y se llenó por primera vez en 1963, para formar un embalse, el lago Kariba, de 280 kilómetros de longitud y 50 de anchura. Previamente, hubo que reinstalar a unas 50.000 personas que vivían a orillas del río Zambezi y trasladar a lugares seguros a miles de animales salvajes. La estación hidroeléctrica de Kariba proporciona casi toda la electricidad que Zambia necesita y gran parte de la que utiliza Zimbabue.

Noria de Mohammadieh, Hamah, Siria.

Cuando las orillas de un río son muy altas, como sucede en el río Asi (Orontes), en Hamah, la noria o rueda hidráulica constituye uno de los sistemas más eficaces para subir agua. Esta noria, una de las varias que existen en Hamah desde tiempos de los romanos, tiene un diámetro de 40 metros, lo que la convierte en la más grande del mundo. La rueda, de corriente inferior, tiene una estructura ligera de madera, con un diseño bastante complicado, y una serie de cubos o cucharones en el borde. Cuando los cubos llegan al río, se llenan, y al subir descargan el agua en un acueducto que la lleva a los campos para regarlos.

Presa de Nurek, río Vakhsh, Tayikistán, CEI.

Esta presa, formada por un terraplén de tierra con núcleo de arcilla, es la más alta del mundo y se encuentra cerca de la frontera con Afganistán. Se empezó a construir en 1962 y no se terminó hasta 1980. Mide 300 metros de altura y 700 de longitud en su borde superior, y está diseñada para resistir fuertes terremotos, que son frecuentes en la región. El agua del embalse, que tiene una capacidad de 57.000 millones de litros, se utiliza para generar electricidad y para regar más de un millón de hectáreas de tierra de la región de Amu-Darya.

MARAVILLAS DE LA INGENIERÍA SUBTERRÁNEA

Europa

Túnel del Támesis, Londres, Inglaterra.

El túnel que conecta Wapping con Rotherhithe marcó un hito en la historia de la ingeniería. Fue el primer túnel subacuático y el primero en construirse con un blindaje de protección, que más adelante se convirtió en el método habitual para excavar túneles. El blindaje tiene la función de proteger el techo y las paredes del túnel hasta haber terminado el revestimiento de ladrillo, y facilitar la excavación manual o mecánica. El mérito de estas innovaciones corresponde a Marc Brunel y a su célebre hijo, Isambard Kingdom Brunel, que a la edad de 20 años era ya ingeniero jefe.

Los Brunel iniciaron las obras en marzo de 1825, abriendo un pozo en Rotherhithe, donde instalaron el blindaje del túnel. El progreso fue más lento de lo que se había esperado, debido en parte a dificultades del terreno, por culpa de las cuales el trabajo se desarrollaba en condiciones muy perjudiciales para la salud. Se produjeron, además, dos inundaciones, la segunda de las cuales estuvo a punto de acabar con la vida del joven Brunel, que obligaron a interrumpir las obras por falta de fondos. Un crédito del gobierno permitió reanudarlas al cabo de siete años. Para entonces, Marc Brunel había perfeccionado el diseño del blindaje y consiguió que el túnel llegara a Wapping en 1843. Pronto se convirtió en una atracción turística, local para exposiciones de arte y mercados, y paso de peatones para cruzar el río. Su elevado coste y reducidos beneficios obligaron a la empresa a vendérselo en 1865 a la compañía ferroviaria East London Railway, que lo adaptó para el paso de trenes de vapor. En la actualidad, los túneles gemelos todavía son recorridos por trenes eléctricos subterráneos.

Metro de Moscú, Rusia, CEI.

Moscú posee el tercer sistema de ferrocarril metropolitano más grande del mundo, con una longitud total de 212 kilómetros. La primera sección, construida por el método de abrir y cubrir, se inauguró en 1935. Las obras se realizaron prácticamente sólo con pico y pala, bajo la dirección del futuro líder soviético Nikita Kruschev. Durante la segunda guerra mundial, los 25 kilómetros de líneas ya terminadas se utilizaron como refugio antiaéreo, lo mismo que el *metro* de Londres. Las obras de construcción continuaron durante la guerra, y el primer túnel profundo se inauguró en 1943. Posteriormente, se han construido líneas a profundidades de 30 a 48 metros, superiores a las de los túneles más profundos del *metro* de Londres.

El *metro* de Moscú tiene fama por la opulencia de algunas de sus estaciones y por lo espacioso de éstas; algunas están decoradas con mármol, molduras de escayola, lámparas colgantes y murales. A pesar de ser el sistema con más pasajeros del mundo —unos 2.500 millones al año—, puede que sea el más limpio: es raro ver en él basura o pintadas.

CONSTRUCCIONES ASTRONÓMICAS

Europa

Telescopio William Herschel, La Palma, Islas Canarias, España.

Instalado por encima de las nubes, a más de 2.400 metros de altitud en la isla volcánica de La Palma, este telescopio de espejo único es el tercero más grande del mundo, y el más potente. Su nombre rinde homenaje al famoso astrónomo del siglo XVIII. Se trata de un telescopio de altazimut, controlado mediante miniordenadores y atendido y sostenido por 10.000 toneladas de equipo. Su construcción duró doce años y terminó en 1987.

El espejo, de 17 toneladas y 4,5 metros de diámetro, está hecho de cristal cerámico especial, no dilatable, pulido con una precisión de una diezmilésima de milímetro y revestido de una película de aluminio que pesa medio gramo. El telescopio es tan sensible que podría detectar la llama de una vela a 160.000 kilómetros de distancia, y se utiliza para captar fotones —partículas de luz—, desviándolos hacia una multitud de aparatos detectores, que proporcionan a los astrónomos información sobre objetos espaciales increíblemente lejanos.

El más importante de estos instrumentos es el espectrógrafo, que descompone la luz en sus diversos colores; por la desviación de la franja de color hacia uno u otro extremo del espectro, los astrónomos pueden saber si una estrella se está acercando a la Tierra o alejándose de ella.

Índice (Volúmenes I y II)

Nota: Los números en **negrita** indican que se le ha dedicado al tema una cierta extensión de texto. Los números en *cursiva* se refieren a ilustraciones y pies.

A

B

C

CH

D

E

F

G

H

O

P

Q

R

S

Agradecimientos

Créditos fotográficos

i = izquierda; *d* = derecha; *c* = centro; *a* = arriba; *ab* = abajo.

13 Ancient Art and Architecture Collection; 14, 15 The Illustrated London News; 17 The Photo Source; 18 Topham Picture Source; 19*i*, *ad* y *cd* Marc Riboud/The John Hillelson Agency; 19 *abd* Bruce Coleman Inc; 20-23 Alex Webb/Magnum; 24 Robert Harding Picture Library; 25 Richard Laird/Susan Griggs Agency; 26 UPI/Bettmann; 27 The Image Bank; 28 UPI/Bettmann; 29 The Image Bank; 30, 31 UPI/Bettmann; 33 Mark Wadlow/URSS Photo Library; 34 V. Shustov/Novosti; 35*ci* y *d* Tass; 35*ab* URSS Photo Library; 38 Ancient Art and Architecture Collection; 39, 40 Robert Harding Picture Library; 41 John P. Stevens/Ancient Art and Architecture Collection; 42-43 David Hiser/Photographers Aspen; 44 Loren McIntyre; 45*i* Werner Forman Archive; 45*d* Hutchison Library; 46*ai* Robert Harding Picture Library; 46*ad* Ancient Art and Architecture Collection; 46*ab* Tony Morrison/South American Pictures; 47*a* E. Streichan/The Photo Source; 47*ab* Tony Morrison/South American Pictures; 49 Ancient Art and Architecture Collection; 50 Robert Harding Picture Library; 51 Topham Picture Source; 52, 53 The Image Bank; 54*a* Tony Stone Associates; 54*ab* Stephanie Colasanti; 55 Robert Harding Picture Library; 56*a* The Image Bank; 56*ab* Mischa Scorer/Hutchison Library; 57 Scala; 58-59 Marc Riboud/The John Hillelson Agency; 60 George Gerster/The John Hillelson Agency; 62, 63 Stephanie Colasanti; 65 Guildhall Library/Bridgeman Art Library; 66, 67 Ann Ronan Picture Library; 68*ai* Mary Evans Picture Library; 68*ad* The Mansell Collection; 69*ai* Sefton Photo Library; 69*ad* Mary Evans Picture Library; 69*ab* Architectural Association; 70 Robert Harding Picture Library; 71 Ancient Art and Architecture Collection; 72 Topham Picture Source; 73, 74*ad* Robert Harding Picture Library; 74*ab* The Image Bank; 75 Robert Harding Picture Library; 76 Stephanie Colasanti; 77 Robert Harding Picture Library; 78*c* Ann Ronan Picture Library; 78*abi* y *d* Hulton-Deutsch Collection; 78-79 Ann Ronan Picture Library; 79*d* Mary Evans Picture Library; 79*abi*, *c* y *d*, 80*ai* Hulton-Deutsch Collection; 80*ad* y *ab*, 81 Roger-Viollet; 84 The Image Bank; 85 Angelo Hornak; 86, 87 UPI/Bettmann; 88 The Illustrated London News; 89 UPI/Bettmann; 90-91 Alan Smith/Tony Stone Associates; 92*a* Bruce Coleman Inc; 92*ab* Rene Burri/Magnum; 93*a* Bruce Coleman Inc; 93*ab* Art Seitz/Gamma Liaison/Frank Spooner Pictures; 95 Bavaria/Lauter; 96 Bavaria/Hans Schmied; 97*a* Bavaria/Martzik; 97*c* Susan Griggs Agency; 97*ab* Bavaria/Holl; 98, 99 The Image Bank; 102 Popperfoto; 103*i* The Image Bank; 103*d* Robert Harding Picture Library; 105*a* Bruce Coleman Inc; 105*ab* Mike Powell/All-Sport; 106*a* Andrea Pistolesi/The Image Bank; 106*ab* The Image Bank; 109 Canadian National Tower; 110*a* Panda Associates Photography; 110*ab* Canapres Photo Service; 112*i* Robert Harding Picture Library; 112*d* The Image Bank; 113*i* Orion; 113*d* Northern Picture Library; 114 S. Tucci/Gamma/Frank Spooner Pictures; 115 Mike Yamashita/Colorific!; 116*ai* y *d* Gamma/Frank Spooner Pictures; 116*ab* Mike Yamashita/Colorific!; 117 Gamma/Frank Spooner Pictures; 118 Sophie Elbaz/Gamma/Frank Spooner Pictures; 119*a* Associated Press; 119*ab* Associated Press/Topham Picture Source; 120*i* Gamma/Frank Spooner Pictures; 123, 124, 125 Peter Menzel/Colorific!; 128 Marc Riboud/The John Hillelson Agency; 129 Georg Gerster/The John Hillelson Agency; 130 Sally and Richard Greenhill; 132, 133*a* Georg Gerster/The John Hillelson Agency; 133*ab* Anthony J. Lambert; 134-135 Gilles Mermet/Gamma/Frank Spooner Pictures; 135*a* Mary Evans Picture Library; 136*a* Colin Jones/Impact Photos; 136*ab* Marion Morrison/South American Pictures; 137 Bruce Coleman Inc; 138 The Illustrated London News; 139 UPI/Bettmann; 140*a* Robert Harding Picture Library; 140*ab* The Mansell Collection; 141*i* Paul Slaughter/The Image Bank; 141*d* Hugh McKnight Photography; 142-143 Canadian Pacific Corporate Archives; 144 The Mansell Collection; 145*a* Anthony J. Lambert; 145*c* y *ab* Canadian Pacific Corporate Archives; 147*a* Philip Robinson/John Massey Stewart; 147*ab* Mark Wadlow/USSR Photo Library; 148*a* Roger-Viollet; 148*ab*, 149*ai* John Massey Stewart; 149*ad* Roger-Viollet; 149*ab* Topham Picture Source; 150-151 Bruce Coleman Inc; 152, 153 UPI/Bettmann; 154*a* Leslie Garland; 154*ab* The Image Bank; 155 Bruno Barbey/Magnum; 156-158, 159*a* y *ci* Gamma/Frank Spooner Pictures; 159*cd* y *ab* ANP Foto; 160-161 Anthony J. Lambert; 161 Key Color; 162 Prisma; 163 Key Color; 164 Ancient Art and Architecture Colletion; 165*i* Geoff Tompkinson/Aspect; 165*d* Lee E. Battaglia/Colorific!; 167 Robert Harding Picture Library; 168 Ancient Art and Architecture Collection; 169*i* Michael Holford; 169*d* Robert Harding Picture Library; 170-171 The Photo Source; 172*ai* James Austin; 172*abd* Leslie Garland; 174 Robert Harding Picture Library; 175 The Photo Source; 177-179 Norwegian Contractors; 181-183 Charles Tait; 184-185 B. Clech/Sodel; 186 M. Brigand/Sodel; 187*ai* J. F. Le Cocguen/Sodel; 187*ad* y *ab* P. Berenger/Sodel; 188 Goutier/Jerrican; 189, 190, 191*c* Adam Woolfitt/Susan Griggs Agency; 191*ab* Goutier/Jerrican; 194-195 Scala; 196 Roger-Viollet; 197 Scala; 203 Ivazdi/Jerrican; 204, 205 CERN; 206-209 Seikan Corporation; 210*a* Roger-Viollet; 210*ab* Hugh McKnight Photograph; 211 R. Kalyar/Magnum; 214 Science Photo Library; 214-216 Kermani/Gamma Liaison/Frank Spooner Pictures; 220*a* The Image Bank; 220*ab* Science Photo Library; 221 The Image Bank; 222-223 Alexis Duclos/Gamma/Frank Spooner Pictures; 224, 225 Gamma/Frank Spooner Pictures.

Créditos de gráficos y diagramas

Craig Austin: 27*d*.
Trevor Hill: 50-51, 66-67, 130-131, 162-163, 168-169, 179.
Andrew Popkiewicz: 31.
Simon Roulstone: 15, 27 *c* y *cab*, 41, 45, 55, 61, 73, 93, 100-101, 106-107, 111, 125, 204-205, 208-209, 220.
Paul Selvey: 108, 130*ai*, 136-137, 170, 172-173, 191, 216-217.
Mapas de Technical Art Services Ltd.

DEBATE
ediciones
del Prado

